

第 1 章成功的設計

本章為您介紹了設計電子產品外殼的方法，並定義了成功的設計。我們將討論設計人員在產品需求設置中的角色，其中設計人員將適應整個產品開發圖，溝通的重要性以及開始設計時要考慮的初始因素。在開始之前，我們先簡單定義一下電子產品的含義。它是其中裝有电路板的產品，通常具有某些輸入/輸出設備，例如 LCD。電子產品的示例包括手機，數碼相機和超聲波牙刷。電子產品外殼是包圍並支撐电路板的物品。外殼設備來讓消費者可使用。出於多種原因，必須使用該外殼—為了保護電子設備（电路板和 LCD）免受環境或物理震動（如掉落產品）的侵害。外殼可通過按鍵或按鈕訪問設備的輸入信息，並允許從設備傳輸信息。外殼提供了結構，因此可以支持和保護电路板邏輯。近年來開發的一些非常有效的產品外殼的示例是 Apple iPhone 7 或 HP Spectre 便攜式計算機（均為大約 2016 年）。本質上，一種成功的外殼設計將是一種設計，該設計要符合產品的書面規格（規格），並且要在設置的成本和時間參數內完成設計。現在讓我們開始設計這些機箱的過程。

1.1 設計指南

本文旨在作為電子產品外殼成功進行機械設計的設計指南，僅供參考。讓我們分解上面句子中的某些詞以進一步定義（在其子主題中定義成功一詞）。設計指南:本文是一個起點，是參考點。設計師將在他們的工作中使用許多指南。本文旨在提供一般幫助，並有助於增加設計師的整個過去經驗以及他們目前的組織的既定過程。

電子產品外殼 (EPE = 電子產品外殼):電子產品外殼由產品的外部 and 內部結構元素組成。它包括用於用戶接口的任何硬件，用於連接電纜的任何連接器，以及用戶會感覺和看到的任何元件。許多電子機殼包含一個或多個 PCBA（印刷电路板組件），必須對它們進行嚴格的常規使用保護。外殼可能非常簡單，也可能非常複雜，具有成千上萬個單獨的零件。設計師的首要任務之一是定義他們正在設計的系統，這將在下一章中介紹。術語外殼（在本文中）將位於頻譜不太複雜的一端，並且可以將所解釋的方法擴展到更複雜的設計情況中。

EPE 設計師:這是負責設計電子產品外殼的人員。在許多情況下，它是機械工程師，但也可以是在機械工程方面具有背景知識或具有該領域經驗的人。優秀的 EPE 設計師將具有以下特徵：

- 理解並符合產品規格的能力
- 能夠添加並幫助創建產品規格
- 為產品提出的問題創建創造性的解決方案

因此，EPE 設計人員必須既有創造力，又要遵循項目的主要目標。

1.2 定義整體團隊

本部分的目的是表明工程（尤其是機械工程）不是自己設計產品的；而是產品本身。他們當然是團隊的一部分。整個團隊的特徵是團隊可以是：

- 大團隊或小團隊
- 位於一個位置或分佈在全球
- 資源有限或可以訪問幾乎無限的資源
- 是否擁有最新工具
- 出於各種原因而實現目標的動機
- 經驗豐富

整個工程工作包括多個學科之間的设计融合。這些學科包括：

- 電氣工程
- 軟件和固件工

程 • 機械工程（包括結構和熱學） • 工業工程 • 系統工程 因此，已經認識到機械工程只是電子產品總體工程設計的一部分，並且許多決策是與其他學科合作制定的。當代產品設計應在生產發布產品的所有因素之間權衡取舍。確實，整個工程工作（第 1.2 節中的所有學科）只是產品發布（銷售）的全部工作的一部分。除了工程上的努力外，還有以下幾組的貢獻：定義了每個組，然後具體說明了機械設計與該組交互的方式。這些都是為了強調機械設計不是獨立完成的，而是作為多任務產品交付團隊的一部分。市場營銷（包括來自銷售的投入）該組織負責產品定義，即從客戶的角度定義客戶想要什麼以及產品將是什麼。該產品定義通常採用工程形式將作為產品要求接受的文檔的形式。營銷還負責監督特定產品如何適合公司的整個產品線（或公司的部門）。EPE 設計人員與市場營銷部門進行交互，以定義產品將如何工作，該功能如何向客戶展示（用戶界面）以及產品對客戶的外觀（工業設計）。運營（製造）該組織負責單個組件的完整材料流程，以及如何製造，組裝和交付這些單個組件給客戶。如果工程部門負責產品文檔，則操作人員能夠獲取該文檔並獲得符合產品規格的產品。EPE 設計人員通過對零件製造技術，供應商（供應商）選擇以及質量/成本/外觀之間的任何取舍做出決策，從而與運營相交。測試（設計驗證）該組織負責測試原型設計和成熟設計。這可以通過機械設計組（本身）中的資源或特定功能的獨立設置來完成。EPE 設計器通過執行或查看測試結果來與測試功能相交。在產品上進行的測試實際上是產品需求文檔（PRD）的一部分，並且必須證明該產品通過了該文檔中定義的測試。例如，如果 PRD 聲明產品必須承受一米高的跌落，則必須定義一項測試，其中包括以下注意事項：

- 一個項目有多少個（測試中）
- 物品的撞擊面或角落
- 進行測試的環境（例如環境溫度）
- 統計問題（例如必須通過測試的單個項目數）
- 測試順序（單元將進行的各種測試中）
- 生存的定義（測試後功能或外觀的程度）

質量控制/質量保證該組織確定單個零件（或整個組件）的可接受極限是否滿足單個產品規格（圖）和已建立的總體公司標準中指定的標準。質量控制將與戰術情況有關，而（公司）質量保證將與戰略情況有關。大多數公司都有控制和監視產品質量的各種方法，並且肯定會涉及到客戶滿意度和服務問題。EPE 設計人員通過在其文檔中指定每個零件的可接受性極限來與該組織相交，並且可以將所有零件包括在內。通常，可接受性限制採取以下形式：

- 圖紙公差中指定的尺寸（幾何）控件
- 圖紙上註明的材料和鍍層規格
- 圖紙上規定的外觀缺陷排除標準
- 功能規格如圖紙所示
- 確定零件文檔某些方面的關鍵性質。

服務該組織負責產品功能的維修，保修和退貨。它們有助於確定設備現場問題的解決方案。EPE 設計人員通過設計合理的過程來拆卸和維修產品，從而與此組織相交。當然，設計可靠的設計將減少維修的理由。還可以提供確定產品濫用的方法。項目管理該組織負責跟踪以下項目：

- 時間分配-遵守約定的最後期限
- 資源分配
- 優先級管理（針對單個項目以及相對於爭奪相同資源的項目）
- 符合產品規格
- 實現成本目標
- 項目報告情況

EPE 設計人員通過報告機械零件責

任的所有單獨行項目的時間和資源估算與該組織相交。首先從產品概念化，設計、原型設計和測試開始，直到後續的最終 版本文檔。隨著里程碑的實現，時間和資源的估計也會更新。高層管理人員包括負責該項目並需要了解該項目的任何人。項目更新將在項目期間的特定時間提供給該小組。高層管理人員將為項目提供領導力和遠見。EPE 設計器以間接方式與高層管理人員相交。項目狀態的報告在任何時候都是相關的，通常是通過項目經理提供的。

1.3 產品要求

確定成功是滿足或超過項目要求的問題。這是一個簡單的聲明，但實際上在相互關聯的方面非常複雜。如果項目達到了目標，則可以確定為成功。這些目標可以通過以下一份或多項書面文件解決。產品要求文檔（PRD）該文檔可以使用多種名稱（因公司而異）。基本上，這是試圖指定產品基本功能的合同。它可以像幾個參數一樣簡單，也可以極其複雜。它可以包含：

- （a）在什麼樣的產品將實現為客戶的描述-它通常也無法精確地規定的產品將如何工作。也就是說，關於如何從這裡到達那裡的細節並不明確。該描述使用的是產品最終外觀上的文字，而不是內部工作原理的細節。後續文檔（或規格）也可以指定產品的詳細信息。同樣，在產品的市場營銷和工程設計間達成協議。PRD 的內容詳細信息可能有所不同。這是（應該）更新，該項目的過程中，作為元素得到修訂或增加。在每次整體產品審查時，都應該在設計與 PRD 的符合程度上進行比較。
- （b）產品如何與客戶互動的說明。這個會包括：
 - 如何向客戶顯示信息或如何從客戶向產品獲取信息。這可以是視覺，聽覺或觸覺的。
 - 產品的各種接口，例如連接器，開關或按鈕。
 - 用於向客戶提供信息的標籤或圖標。
- （c）產品各個組成部分的說明。也就是說，如果產品（正在設計的產品）需要其他設備或電纜才能在較大的系統中運行，則將需要描述系統的各個部分。因此，人們將需要圍繞該產品（正在設計）的確切內容劃界。給客戶的交付物到底是什麼？
- （d）表明產品的最終美學（外觀），實體和工業設計通常都非常詳細。
- （e）產品將在其中運行和存放的環境的清單。包括溫度、衝擊、跌落、振動、濕度、出水保護、運輸條件、海拔高度和特定的腐蝕性氣氛。
- （f）產品需要通過的任何標準的清單。其中包括安全和法規標準，例如安全性 保險商實驗室（UL），電動勢電磁干擾（EMI）的聯邦通信合規性（FCC）以及當今設計世界中真正存在的數百種其他合規性標準。其中一些標準是針對特定國家/地區的，而另一些則在全球範圍內被接受。顯然，與醫療，食品或兒童玩具有關的任何事情都將通過自己的嚴格測試標準。內部測試報告這些表示積極的測試結果。這些測試結果表明 PRD 中的要求及通關。如果尚未通過測試，則將啟動行動計劃以改進產品並進行進一步的測試。初始客戶的報告這是 alpha 或 beta 測試，其中客戶反饋為正面或負面。希望客戶從產品中獲得可衡量的價值。當此“實際”反饋可用時，可以對產品進行合理的改進。Alpha 測試通常由內部模擬實際客戶的人員完成，而 beta 測試通常在將現有客戶發貨給實際（付費）客戶之前進行。

項目管理報告:

- （a）支出（預期與實際）:這包括薪金、固定設備、工具等的支出。對支出的監控可以

導致對真實成本的分析，項目的投資回收期以及對未來項目費用的更好預測。

(b) 里程碑日期的狀態（預期的與實際的）：與費用一樣，對項目實現其時間承諾的監控程度可以表明該項目的真正投資回收期。分析未達到里程碑的位置可以為將來的項目提供更好的預測。可以通過以下方式對成功（隨著產品在現場的成熟）進行持續的分析：質量保證報告其中包含有關客戶滿意度和保修退貨的信息：必須迅速解決產品的任何問題或問題，以保護公司在行業中的聲譽。如果需要進行修訂，則必須立即執行。因此，如果客戶滿意度達到一定的可靠性水平，則產品設計團隊將獲得成功。從項目的所有學科中分析經驗教訓：每個項目都將包含本可以做得更好的項目。應努力不斷改進。應該有一種方法可以收集產品設計過程中每個人有關需要改進哪些項目的反饋。這將提高未來項目的成功率。預期銷售額與實際銷售額。銷售數字可以表明該項目的成功—從某種意義上說，市場營銷已經預測了對產品的需求，工程/運營已將產品交付給客戶，並且客戶確實（確實）對產品進行了估價。或者，在相反的情況下，銷售額可能會低於預期（預測）。發生這種情況可能有多種原因（例如）：

- 產品並非（確切地）滿足客戶的需求（價格太高/性能功能太低）。
- 產品進入市場為時已晚，也就是說，將產品投入市場花費的時間太長，客戶現在有了更好的選擇。
- 產品進入市場為時過早（早期採用者不足）。當產品的技術與（當時）客戶的價值不匹配或其他支持技術尚不可用時，就會發生這種情況，這將使該特定產品完全有用。
- 低可靠性。

以上所有原因都應放在競爭舞台上。也就是說，大多數產品在其市場中都有競爭。客戶將根據對性能，價格和質量的需求選擇購買。新技術解決方案必須與舊解決方案競爭。在產品發佈時很難獲得所有數據來確定產品設計工作的成功程度。在以下情況下，產品設計通常會增加成功的風險：

- 里程碑完成日期被不合理地縮短了。
- 設計中包含大量的全新組件。
- 對項目的更改（添加）以難以控制的速度發生。

成功的設計簡單描述為：

- 1.按規格運行
- 2.按計劃時間表按時交貨
- 3.按預計成本交貨

當然，項目可以超越的功能，交付提前的時間，也許甚至以更低成本。這將是值得慶祝的原因（儘管需要進行一些檢查以弄清事實與可預測因素不匹配的原因）。然而，在上述用於成功設計的簡單陳述的背後，有一些非常大的含義，而並非那麼簡單。讓我對以上三個變量進行一些分解。這三個方面在幾個層面上相互關聯。

1.3.1 規範功能 規格有多種形式。它們可以是書面文件，會議記錄，甚至是口頭指示。項目創建規格的方式因公司而異，實際上在公司內部也可能有所不同。同樣，您（特定的設計師）可以進入整個項目的各個階段。因此，沒有任何一種特定的方式可以使工作描述向 EPE 設計者展現。儘管 EPE 設計人員最終不負責設置全部產品要求（在規範中），但設計人員的輸入至關重要。EPE 設計人員將負責提供有關設計限制可以走多遠的信息。例如，如果產品要求確定的衝擊等級最大為 40 g，則 EPE 設計人員必須對可能的衝擊等級或已經達到的衝擊等級進行一些研究（或一些初始測試）。因此，最初是提議 40 g 級別的，EPE 設計者必須同意該級別或提出不同級別

的論點。甚至可能 會同意更高的 g 量。同樣，如果規範中的成本目標似乎過於激進，EPE 設計者必 須在其預算部分中做一些功課，以向項目規範提供合理的數據。 EPE 設計師需要關注的重要項目是寫下規格說明以及項目的各個成員之間的 後來的協議（正式或非正式）。例如，讓我們說一般的任務是設計可移動磁盤驅 動器模塊之一。這是導致其“成功設計”的一些可能情況。 任務（示例）：可移動磁盤驅動器模塊方案 1：最少的輸入（給設計者）-規範 的開始 這將意味著在進行設計時只需要口頭信息即可（如上所述）。設計人員可能會繼續尋找會影響設計的項目，例如：

- 1.將驅動器卸下多少次？只是為了維護還是它更像一天一次來保護數據？
- 2.模塊可以設計多大？
- 3.模塊（在基本單元中）是否有現有的開口？
- 4.磁盤驅動器是否有電擊問題（電擊的等級如何）？
- 5.此模塊是否可以在其他基本單元中使用？

此時必須考慮這些問題，以便就如何進行設計達成共識。現在應該舉行正式或 非正式會議（通訊）以獲取答案，即使當前答案目前未知。 在這一點上做的重要的項目是為設計師創造他/她自己的設計寫下什麼是工作 規範是已知的（和未知）關於設計。現在，每次在與項目有關的人員的同意下（此 時），都可以根據需要對文檔（再次創建規範）進行必要的修訂。此時的文檔不 必太長。例如，在我們啟動的磁盤驅動器示例中，它可以盡可能簡潔：

項目：磁盤驅動器模塊作者：（設計人員） 修訂級別：1（日期）

- 設計要求：
- 磁盤驅動器模塊將在 20 g 的衝擊負荷下運行。
- 磁盤驅動器模塊將承受 100 g 的衝擊負載（不工作）。
- 磁盤驅動器模塊附近的周圍空氣最高溫度為 30°C（操作）。

以上僅僅是本規範的開始，但是正如已知的（指定的）更多內容，設計人員可 以繼續進行。之所以可以繼續進行設計，是因為設計者現在已經對成功有了一些 想法，也就是說，設計是否通過了旨在確定設計是否通過規格的測試。在此方案 中，只需最少的輸入，就肯定會添加規範，並且與該項目有關的許多人都需要審 閱並批准該規範。但是，設計者至少可以繼續取得一些進展或顯示一些設計選 項。

- 方案 2：完整規範 該規範描述了詳細的所有機械設計的要求。（該規範實際上詳細描述了設計中 所有設計元素的所有要求，不僅是機械部分，而且我們將在此處集中說明機械要 求。）它將包括：
- 產品說明
- 產品財務
- 產品排程 它將在其設計要求中包括以下所需的詳細信息：
- 模塊可直接插入背板以滿足電源和信號要求
- 模塊可在非金屬表面上滑動，以方便進入/退出（加上大量其他要求，包括環境、人體工程學、電氣接口、機構認可、所需測 試等）

- 方案 3：工作規範 該規範是（到目前為止）設計人員遵守的最常見的規範。規範的完整性介於完整和無意義規範之間（場景 1 和 2）。對於工作規範，項目經理通常對設計約束 有一定的了解，但尚未全面審查所有方面。現在，該規範處於變更控制之下，也 就是說，在項目的開始階段就經常對其進行更新，並且任何變更或增補將由項目 人員負責並負責簽名。隨著項目的成熟，對重大變更進行嚴格的審查，因為這些 變更會極大地影響項目的完成日期。

1.3.2 準時按計劃進度交付

在項目期間準備各種時間表。每個（由項目團隊批准的）進度表都是當前項目

進度表的快照。重要的第一個時間表是用於證明項目合理性的時間表。該進度表將被用作項目的淨現值（NPV）。該 NPV 項目進度表將包括以下方面的最佳估計：

- 完成項目所需的人力資源（在給定日期之前）
- 完成項目所需的資金（在給定日期之前）
- 產品的預期銷售以及以什麼價格出售（如果在給定日期之前銷售產品）
- 產品的預期銷售成本（如果在給定日期之前銷售產品）

因此，如果該項目在其預期日期（即進度表當前指出的日期）之前完成，則該項目具有預期的價值。但是，在項目進行過程中，各種注意事項可能會發生變化。他們可以：

- 出現技術問題，改變了原始設計的實施。
- 從事項目變更的人員（特定成員或團隊規模）。
- 修改項目範圍（增加或減少）。
- 隨著項目的進行，修訂各種項目組成部分的成本。

隨著每個（以上）考慮因素的變化，項目團隊將開會確定其對整個項目進度的影響，並查看其如何影響項目的淨現值。決定以修訂後的 NPV 繼續該項目或中止該項目。通常，隨著項目時間的延長，與該擴展相關的費用會更多，並且淨現值會降低。回到將成功確定為按時交付給項目進度表之後，每個項目都可以通過剖析任何延長時間進度表的原因來分析它們是否確實按時交付給項目進度表交付了該項目。如果被認為是合理的，則該項目在這方面可以被認為是成功的。

1.3.3 按預期成本交貨

正如時間表可以更改（在上述 1.3.2 節中）一樣，產品的成本或設計和交付該產品所需的成本也可以更改。成本可能會因以下原因而發生變化：

- 修改了完成項目所需的人力資源。
- 完成項目所需的資本資源被修改。
- 修訂了產品的預期銷售成本。

因此，正如進度表更改並確定更改是否合理和符合，項目成本也可能以類似方式更改。如果確定項目成本的更改是符合且合理的，則從成本角度來看，該項目可以被認為是成功的。當然，上述三個因素（規格，時間和成本）都需要在項目期間和之後進行分析。第 13 章（持續改進）探討了確定項目是否可以視為成功的其他方面。

1.4 草繪與細節

EPE 設計人員必須知道何時在以下兩種模式之間切換：

- 素描：這是一個非常快速的構思階段。通常用鉛筆完成（不要使用橡皮，這會減慢思考過程）。沒有詳細說明這些似乎完全適合這些草圖。規模並不是很重要。稍後再說。獲得了其他人的反饋。速度是這裡的重點。設計師在紙上有了很多選擇，因此可以決定幾個選擇的缺點。
- 細部化：即提供一定數量的細部。所需的細節量取決於情況的嚴重性或獨特性。在草圖階段中，一切正常，您已經遮蓋了可能的絆腳石項目。您已完成此操作以加快整個設計過程，但是現在在詳細信息模式下，需要進行更嚴格的分析。在詳細模式下，您可以準確地計算出設計中的一些關鍵部分。細節通常需要 CAD 設計，以提供真實的幾何圖形並根據情況進行縮放。同樣，至關重要的是，設計審查對於迅速沿著同意的設計道路繼續進行至關重要。我想繼續討論基本佈局，並假設我們正在研究一種全新的設計。許多概念將適用於延續或修改設計。另外，我想繼續進行設計討論，就好像我們仍處於草圖階段一樣。

1.5 設計評論

除了在草圖和詳細模式之間來回移動（如上）外，設計師還需要對何時讓設計團隊中的其他人審閱或評論他們的設計（無論處於何種階

段的設計)有紮實的感覺。這些設計審查中的一些是非常正式的，而其他設計審查可能是非常非正式的。正式設計評審通常是按照項目進度計劃中的計劃里程碑進行的。他們包括設計團隊的特定成員，並由這些成員明確簽署。非正式的設計評審是偶爾和/或自發進行的。就像設計師去下一個辦公室並要求同事檢查或在設計師認為足夠接近設計問題或已有經驗的少數人中召開簡短會議一樣簡單具有類似的設計。關於設計評論的一些一般性評論：

- 1.參加會議，並注意參加會議的人。
- 2.(至少，粗略地)記錄所提出的所有(相關)問題。
- 3.可能邀請不熟悉基本設計的人參加設計審查。他們可以是公司內其他部門或部門的人員。有時，當他們從不同的角度查看問題時，此人可以在問題上添加不同的觀點。
- 4.簡要回顧設計的主要目標。
- 5.設計者已經考慮了提出的一些想法；那是很好，請按照您的原理快速進行。
- 6.有些想法(最初)似乎沒有價值或不切合實際。只是注意他們繼續前進；您可能稍後會看到該值。
- 7.您將從設計評審中獲得價值-如果您開放，它總是會發生的。感謝所有相關人員，因為他們為您提供了他們的見識和經驗。
- 8.將您在會議上的筆記發布給與會人員和整個項目團隊。這將記錄您和其他人採取的進一步行動，以使設計取得進展。要求您的設計審查團隊提供進一步的意見。

1.6 溝通

溝通是設計成功的必要條件。該句話本身是正確的，但值得進行更充分的討論。

1.6.1 溝通目的

交流的目的是傳達有關設計的信息。之所以需要這樣做，是因為信息可以提供問題的答案，記錄當前存在的設計以及記錄設計的演變。交流可以書面、電影或口頭形式進行。書面文件的形式為：

- 規格
- 圖紙
- 項目會議記錄/時間表
- 筆記本中的筆記
- 特定於項目或程序的電子郵件(任何數字通信)

電影文檔是項目過程，測試和事件的攝像機記錄。口頭交流是使項目進入完成狀態的任何語言。所有重要的口頭交流都需要以書面形式進行，以便項目的所有成員都可以審查這些交流。

1.6.2 溝通的價值

良好的溝通將使項目更加成功。良好的溝通具有以下屬性：

- 準確-信息真實，並有測試/文檔支持。
- 簡潔-信息直截了當，沒有過多的措辭。
- 分佈式-分發給所有需要信息的人員。
- 快速-信息迅速傳播。
- 提供解決方案-為問題提出解決方案，可以加快解決過程。

1.6.3 通信鏈中的鏈接

交流的目標之一是將信息提供給需要信息的人。如 Sect 1.2 中所示。項目團隊可以包含很多學科。電子郵件分發和文檔控制分發很容易創建。EPE 設計師應該在項目團隊的所有相關人員之間做出決定，這些人對於做出需要做出的決定至關重要，並且僅出於不同身份的這些人。

1.7 工程經濟

不討論工程經濟學的基本原理，就不可能完成關於成功設計的章節。在幾乎所有的工作中，付出什麼代價都是最重要的考慮因素。在許多產品設計中，它將成為產品成功或失敗的主要原因之一。第 4 章將討論成本與時間與規格之間的權衡，但是現在，讓我們開始討論，指出 EPE 設計人員必須能夠提供成本信息和一些收支平衡分析。在參考文獻中指出：如果一個工程項目要成功滿足人類的需求，則其設計和運行必須保證物理和經濟上的可行性。由於成本是如此重要，因此設計師需要：

- 1.注意什麼成本目標(對於單個零件還是整

個零件)組裝用於設計。 2.注意所設計零件的材料和工藝選擇。EPE 設計者有責任提出各種選擇，以通過 (也許)在功能上進行折衷來達到 (或降低)成本目標。設計人員在任何情況下 都不應在任何安全考慮上妥協。必須將所有選項清楚地呈現給管理層，以便可以 全面確定所有折衷方案。這是 EPE 設計師為產品整體設計帶來的最重要的創造力 元素之一。 3.為適合產品整個生命週期的材料和過程提出解決方案。與成熟生產相比，某些 解決方案可能更適合早期生產 (上市時間非常關鍵)。 4.根據訂購的適當數量，將成本信息提供給項目團隊，以使這一重要指標始終眾 所周知。讓我們來看一個例子。如第一章所示。在圖 4 中，提到了是否工具化零件的選擇。可以通過以下方式分析這種類型的問題：(每種情況下每月需要 200 個零件) ●選擇 A：供應商 A 的非工具零件成本為 5.00 美元 ●選擇 B：設計工具零件，並讓供應商 T 製作工具。成本估算：加工零件成本為 \$ 1.00，加工成本為\$ 4000.00 模具成本和新零件成本在什麼時間等於舊零件成本？這就是所謂的收支平衡 點。 答：這很容易計算或繪製 (見圖 1.1)： $(\$ 5 / \text{份} \times "M" \text{ 個月} \times 200 \text{ 份/月}) = (\$ 1 / \text{份} \times "M" \text{ 個月} \times 200 \text{ 份/月}) + \$ 4000$ 顯示為 5 個月。因此，選擇 B (工具版本)與選擇 A (非工具版本)收支平 衡需要 5 個月的時間。5 個月的總費用為： $\text{ChoiceA} = \$ 5 / \text{零件} \times 200 \text{ 零件/月} \times 5 \text{ 個月} = \$ 5000$ 圖 1.1 加工與非加工零件的收支平衡點 $\text{ChoiceB} = (\$ 1 / \text{零件} \times 200 \text{ 零件/月} \times 5 \text{ 個月}) + \$ 4000 = \$ 5000$ 5 個月後，對於工具 B 的 Choice B，總成本將減少。顯然，如果產品生產了 5 個月或更長時間，我們將選擇對零件進行加工。但是，上述經濟現實實際上有一些複雜之處。選項 B 的費用 (上述) 不包括： 1.設計和記錄工具零件的成本。 2.競標該工具並確定供應商 T 是最佳工具的成本供應商。 3.對工具零件進行原型製作的成本 (在批准工具圖紙之前部分)。 4.批准工具零件的第一篇文章的費用 (我們在此假設第一篇文章已獲得批准-希 望不需要任何工具修改，因為這將是額外的費用)。 5.測試工具零件的成本 (作為未工具零件的替代品)。 6.用完未使用工具的零件並切換到使用工具的零件的成本。(該零件所在的裝配 體是否應標上日期代碼以記錄更換事項?) 7.模具的成本。也就是說，工具的成本為\$4000 實際價值超過\$4000。 如果不將 4000 美元提供給工具製造商，則對公司而言將是賺錢的興趣。簡單 利息計算將獲得 4000 美元的利息 (按 2%/年計)： $4000 \text{ 美元} \times 0.02 / 12 \text{ 個月} \times 5 \text{ 個月} (\text{收支平衡時間}) = 33 \text{ 美元}$ 。但是，這裡的問題可能是： 公司用 4000 美元能做些什麼，而不是僅僅創造 33 美元的單利呢？也許他們可 以將其投資到新產品的開發中，該產品可以產生更多的收入，或者將其用於另一個可以帶來更多收入的項目的其他工具上。是的，這並不簡單。 在上面的七個項目中，設計和記錄工具零件的成本並不是一筆小數目。如果設 計，文檔製作和原型製作需要 1 週的時間，則在設計人員的時間內，使用工具化 零件可能會使公司損失 1000 美元 (例如，每週工資為 1000 美元)。大多數公司在收支平衡分析中不會考慮上述七個項目，但是在某些情況下值得 考慮。設計人員需要熟悉的另一個術語是投

資回報率或簡稱為 ROI。這類似於前面所 述的收支平衡點，但提出的問題略有不同。在與上述相同的問題中（選擇 A 和 B），該問題將提出：4000 美元的工具降低 5 美元零件的單價的投資回報是多少？一旦知道了新的 加工件價格（1 美元）並訂購了數量（例如，每月= 200 個零件/月），則 $ROI = 5$ 個月。因此，基本上 4000 美元的投資回報將為 5 個月。本章小結第 1 章向我們介紹了電子產品外殼的設計。由於我們並不孤單，因此本章還定義了設計中涉及的其他主要團隊及其通常的功能。本章向我們介紹瞭 如何將設計視為成功，以及設計如何滿足（或超過）定義的產品要求。本章將帶您進入幾個設計方案，從完全定義的規範到簡約的規範，我們應有盡 有。我們定義了以素描或高度詳細模式進行設計的方式。討論了一般設計過程中設 計評審和良好溝通路徑的需求。最終，工程經濟學的主題開始了。這將在第一章中進一步放大。第 2 章構建設計 我們的設計都會從產品構思開始。這些想法將需要得到證明，因此，我們將繼續 構建原型，如果這些原型可以通過對某些紙本規格的測試而做使用，那麼我們將 通過圖紙記錄設計。我們需要此文檔才能以可重複的方式構建更多產品。本章將帶您了解產品的觀點出發，一直到最佳地擺放構成最終工作設計的所有 單個對象的方式。我們從無開始設計，然後紙中將充滿物理的對象。首先要關注 的是確定紙張是否確實是空白或是否存在一些開始的限制。下一個需要關注的項 目將是確切的確定要包括哪些物理對象。然後，我們應該基於總體設計的目標， 假設這些對象的放置位置是最佳的，因此我們將以一些措辭來總結一下該對象放 置的選擇。

2.1 起點 設計師的任務是繼續進行現有設計或開始全新的設計。讓我們花一點時間看看這 些起點之間的區別。

- 全新的設計：這是設計師整潔開始；除了遵守規範外，它們基本上沒有任何限 制。我們將在整個章節中討論確切的規範及其各個組成部分。
- 延續（或增加）現有設計：這是對全新設計的變體，但是現有設計中只有一小 部分需要修改。這裡的設計師面臨著與全新設計相同的許多挑戰，但是其他工作 必須利用現有設計。我們將在單獨的章節中定義在此上下文中系統的確切含義。
- 現有設計的重大修改：同樣，這是對全新設計的變形，但是在這種情況下，原 始設計的很大一部分都需要修改。設計人員的任務是更改整體設計的一部分，因此與全新設計相比，存在更多約束。因此，重要的是要知道當前的設計工作將適合先前所做的工作。我們的基本佈 局可以在有或沒有先前工作約束的情況下進行。

2.2 定義設計邊界：系統說明 關於定義正在設計的系統的幾句話：設計可以是極其複雜和龐大的（例如航天飛 機或大型客機），較小的系統（例如汽車）或較小的系統，例如個人計算機，咖 啡機或手機。所有這些設計項目的範圍，成本，時間，承諾的資源數量以及與其 他設備的接口都不同。設計人員必須牢記所設計的系統。出於多種原因，這很重 要，其中包括：

- 關注個人責任（工作範圍）
- 了解必須與該設計交互的其他設備
- 整體的系統功能（不僅僅是子系統的功能） 甚至像手機這樣小的東西也可以作為大系統的一部分。即為消費者購買的套裝 中也可以包含：
- 手機
- 充電器
- 電纜
- SIM 卡
- 使用說明書
- 其

他運輸材料（標籤、袋子、氣泡包裝）（我們將在這裡限制對系統的討論，因為甚至可以想到一個更大的系統，其中 包括手機信號塔和衛星系統。）我們從系統描述開始，因為大多數電子機箱都圍繞並支撐產品。有時，可以將一種產品視為較大產品的一部分。例如，可以將網絡卡（產品本身）放入微型計算機（第二種產品）中，並形成一個全新的產品，在本例中為可聯網的微型計算機。使可聯網微型計算機本身形成網絡的一部分，事情可能變得更加複雜，這可能是更大的產品。用另一種方式看待事物，我們可能只被設計為更大系統的子系統。因此，我們的系統甚至可能不是產品，而只是更大的系統的一部分，該系統已被分解為（時間）可管理的部分。圖 2.1 系統說明 例如，我們可能需要設計一個數據記錄器，作為（較大）測量系統的一部分。該系統如圖 2.1 所示。該系統至少包括三個主要子系統：•數據記錄儀 •數據記錄儀安裝支架 •測量桿（標記為桿），它包括另一個子系統，數據記錄器支架 實際上，該系統中甚至會有更多的單獨部分，包括電纜、運輸容器（盒子）和說明手冊（但在此示例中，我們將其忽略）。附帶說明一下，圖 2.1 中的系統是 Trimble Survey 系統的照片，該系統出現在華盛頓特區的史密森尼博物館中。我們已經成為測量員系統設計組的團隊成員，並將設計一部分總體設計（數據記錄器部分）。因此，我們的首要任務是確定我們到底要設計什麼（在給定的時間內圍繞我們負責的項目建立範圍之類）。要完成此任務，我們將需要一個規範。

2.3.1 總體項目開始到項目完成 設計可以進行任意數量的方式。所有公司在執行整個產品設計過程的方式上都各不相同，但是它們確實具有一些共同的特徵。沒有什麼特別的方法是絕對正確的。最終結果（符合規範）是衡量成功的標準。設計通常按以下步驟進行：EPE 設計人員將承擔後續任務的絕大部分。他們將是許多工作的執行者和推動者。如果他們自己不做這項工作，那麼他們肯定會對這項工作負責。

- 1.構思草圖這是項目的理想的階段。一旦想法採用某種形式，就可以輕鬆地對其進行審查和修訂。審核小組中的某些人需要對構想有了解才能真正看到所提出的內容。
- 2.審查想法並授權進行原型製作-此操作將設想轉化為團隊可以實際接觸的東西。現在可以以客戶使用產品的方式來拾取，保存和使用草圖形式中看起來不錯的產品；原型是一張完整的三維圖片。授權很重要，因為這些項目通常在時間和金錢上受到限制，因此這些支出必須團隊同意。步驟 3 和 4（如下）實際上創建了原型。
- 3.繪製（文件創建）原型製造的設想方案，草圖是轉換成數字化的圖形文件，從而可以製作設計。（設計現在將在修訂版 1 上進行。）包括粗體字以顯示正式文檔的修訂版，該文檔將在第一章中進一步擴展。
- 4.原型製造（物理零件）項目團隊將要去確定製造原型的成本和時間限制。有時候，只需要一個快速而簡單的原型即可取得良好的進展。有時需要一個按照嚴格的規範構建的原型。EPE 設計人員應該對開發階段需要什麼有很好的認識。
- 5.原型分析和測試團隊收到原型後，將對其進行測試以查看原型如何符合規範。項目團隊僅確切確定需要進行哪些測試，以決定測試之後如何進行。
- 6.審查原型和測試結果測試結果由團隊審查，

並且提出修訂。(假設修訂版 1 需要改進，我們將設計修訂為修訂版 2。)

7. 進行更改以改進原型(工程圖和原型)這是迭代過程的開始，最終將導致設計符合產品要求。

8.修訂 2 的進一步分析和測試(假設修訂版 2 符合產品規格。)

9.最終文件製作/最終測試/最終審查

10.正式批准生產發布的設計 請注意，上述過程中的下達生產允許生產給定數量的步驟並生產以出售給客戶，或用作更多步驟以用於更廣泛的測試程序。公司在為客戶發布和測試產品的過程上可以有多種方式的差異。另請注意，大多數項目的修訂版將比所示的兩個修訂版多得多，但是該項目通常會如所示進行。

2.3.2 EPE 設計器的開始注意事項

沒有任何絕對正確的方式可以進行 EPE 設計器的設計。每種情況都有其獨特的最佳方法，以使可見的所需進度成為可能。有時，幾天之內就可以放在一起的原型可以為市場帶來令人難以置信的新產品突破。在其他情況下，最好的方法是採用系統的方法來提出一些可能的解決方案，而這些解決方案可能要花數月的時間。話雖如此，以下概述至少應該作為起點對設計有用。

1.確定與負載不直接相關的解決方案的用途和要求。其中一些更重要的要求是：

- (a) 環境產品將在哪裡使用？例如辦公室/戶外門/高度/在車輛上。
- (b) 溫度-環境的極端溫度是多少？
- (c) 預期壽命一次使用，多年保修，服務？
- (d) 成本要求-始終是重要的考慮因素。絕對會取決於生產的單元數量和工裝預算。
- (e) 加工要求-外觀細節可能會大大影響成本。
- (f) 尺寸和重量限制-目前解決方案的界限是什麼行業？影響設計師選擇的材料/製造技術。
- (g) 安全和法規要求-產品故障的影響是什麼？

以上所有這些都是 EPE 設計器設計之初要考慮的非常重要的考慮因素。例如，室內與室外環境會產生不同的設計。與預期使用一次的設計相比，需要經過 1000 次使用後才能工作的設計產生了不同的設計。成本低於 5 美元的設計與成本低於 100 美元的設計產生了不同的設計。通過遍歷以上每個元素，EPE 設計人員可以確定一些初始約束。

2.根據可能需要單個構件(和組件)承受的所有各種可能類型的載荷來確定或估算工作載荷。必須考慮所有可能的載荷組合，並在可能的情況下確定載荷與時間之間的關係。一些可能的負載類型是：

- (a) 靜態
- (b) 穩態動態(振動)
- (c) 瞬態動態
- (d) 撞擊或衝擊
- (e) 身體接觸，例如點載荷或摩擦

上述負載確定對於 EPE 設計人員的設計也是非常重要的考慮因素。例如:10 磅靜態負載與 100 磅靜態負載產生了不同的設計。如果這些負載隨時間變化，這將導致不同的設計解決方案。確定負載的大小和類型將直接確定支撐電氣組件所需的材料和橫截面形狀。

3.確定故障機制將是什麼。由於載荷而發生變形是軸向的、剪切的、彎曲的或扭轉的。可能的失效模式為：

- (a) 總體屈服(整體非彈性行為)
- (b) 破裂或斷裂
- (c) 突然-由脆性材料上的靜態或動態載荷引起
- (d) 緩慢-由延性材料上的靜態載荷引起
- (e) 漸進式-由反復的載荷引起(疲勞)
- (f) 過度變形
- (g) 屈曲
- (h) 蠕變-在恆定應力下變形
- (i) 鬆弛-在恆定應變下改變應力
- (j) 磨損(磨損)
- (k) 腐蝕

通過 EPE 設計人員確定他們的設計將如何失敗(在當前的設計狀態下)，可以修改該設計以防止失敗。測試

還將揭示一些故障機制。但是，如果可以在測試之前考慮其中一些故障機制，則可以節省很多開發成本。總結以上三項，通過確定設計的範例，負載和潛在的故障機制，EPE 設計人員可以在紮實的基礎上進行設計。

2.4 最佳對象放置

可以將大多數設計視為物體在空間中的物理放置。各個對象是整個組件的獨立部分。其中一些個別零件是眾所周知的（它們是從另一家公司購買的現成零件，或者是以以前在內部設計的零件的重複使用）。除了已知零件外，其他零件也需要全新設計。這些新零件可以在內部生產，也可以完全指定由其他公司生產。電子包裝設計主要包括將子系統安排為最有效的安排。決定這種安排的第一步是查看子系統的單獨的體積。這些體積以及它們之間為清除所需的間隙通常將設置在外部邊界，因此，在很大程度上設置了產品的整體尺寸。有時，設計人員首先要考慮的標準是產品的總體尺寸。從這裡，他們必須確定是否可以在給定的總體規模內滿足所有要求。也就是說，確實可能需要子系統縮小以適應給定的整體大小。基本設計過程的一個方面如圖 2.2 所示。這顯示了一個物體（在空間中）與外殼（顯示為牆壁）相距一定距離。我想開始討論電子外殼的設計，並描述幾種圖 2.2 物體/牆壁間隙 這些示例很容易由 2D 擴展為 3D（側視圖或 Z 方向），我將展示該第三視圖的一些示例：

基本物體/牆壁間隙：圖 2.2

顯示了物體和牆壁。對象幾乎可以視為任何事物。例如，它可以是印刷電路板組件，汽車發動機或任何電子組件。牆壁可以視為外殼的外表面或要設計的物品的外部。在幾乎每個設計中，設計人員都必須確定對象與牆之間的距離（間隙）。這裡的想法可以擴展為確定對象 1 和對象 2 之間的距離。這些確定的間隙均不需要彼此相同。X 方向上的間隙可以不同於 Y 方向上的間隙，Y 方向上的間隙也可以與 Z 方向上的間隙不同。

2.4.1 間隙距離

1. 物體和牆壁的公差：

如果要保持特定的距離（例如，假設為 0.100 英寸）和標稱的整體（外部）尺寸，則設計必須允許：

- 極限公差時最厚的外壁
- 可能的最大物體（在物體公差的最高極限處）

請注意，最厚的外壁和最大的物體都減小了 0.100 英寸的標稱間隙距離。（還請注意，最薄的外壁和最小的物體都可以增加 0.100 英寸的標稱間隙。）

- 必須考慮將物體固定在外殼上。也就是說，緊固系統將允許物體在多大程度上靠近外壁？假設對象上有一個簡單的安裝孔，盒子上有一個螺紋孔。物體上的孔要大一些（用於將物體固定到外殼的螺紋孔中的螺釘）。因此，如果緊固件位於通孔的一側邊緣，則物體可能會更靠近外壁。還必須考慮外殼螺紋孔的位置公差（相對於外殼的外壁），因為孔實際上可能更靠近外壁（由於製造公差）。通常，可以忽略此鎖固公差，但在某些間隙有限的緊湊空間設計中，這可能很關鍵。因此，對於到目前為止的間隙示例，僅考慮公差，我們可以具有以下公差：
- 壁厚可能要厚 0.005 英寸。（在受限的整體尺寸下，所有這些都會增加盒子內部的壁厚）。• 物體本身（將孔安裝到物體邊緣）可能處於最大位置公差；這可能是 0.010 英寸。• 由於其位置公差，外殼中的安裝孔可能更靠近外壁。這可能是 0.005 英寸。• 安裝孔可能比（最小）緊固件直徑大 0.010 英寸，從而允許額外移動 0.005 英

寸。以上所有（4）公差都加到 $0.005 + 0.010 + 0.005 + 0.005$ ，總計為 0.025 英寸。註記：（統計註釋）一些設計師會提出一些統計概率（小於 100%），即所有（4）公差都將在一個方向上進行，而我們（可能）不會總共有 0.025 英寸。一些保守的設計師會假設所有公差都將在錯誤的方向上進行，因此設計是最壞的情況。我現在通常不會理會公差的統計方法，但是在空間極為受限的設計情況下，它可能會很有價值。

- 使用平方和進行公差
- 使用蒙特卡洛模擬進行公差

2.物體相對於牆壁的運動（在產品運行過程中）：這也稱為震動公差，即，物體在運行時可能會震動，而牆壁可能會保持牢固。

3.物體的翹曲（在操作過程中）：這可能是由於熱引起的。

4.總體（外部）尺寸限制：內部遊隙距離將受到總體尺寸的影響。也就是說，對於給定的整體大小，對象之間的距離將有一些特定的限制。對象之間的距離將取決於對象的尺寸公差和對象位置的公差。如果總體大小不受限制（稀有實例），則對象大小和對象之間的間隙將確定總體大小。

2.4.2 對象排列

設計人員通常會通過生產排列所有適合安裝在外殼中的物體的方式來最大程度地減小外殼的整體尺寸。這可以在兩個維度（X 和 Y）以及第三個維度 Z 中完成。對象的其他佈置旨在滿足組裝，維修，美觀或用戶界面的需求。為了最小化整體尺寸，選擇了對象之間的一定距離。該距離可以首先被認為是標稱距離。然後可以調整該標稱距離以適合設計。例如，可以假設物體之間的標稱距離為 0.100 英寸（在所有方向上）。當然，所有對象之間的間隙大小不必相同。對象之間的 0.100 間隙可能會產生超出產品期望值的總體尺寸（超出產品規格）。然後，設計師將尋求減少 0.100 英寸的間隙但是，該間隙不能小於零，也不能小於任何最壞情況的問題，例如，在其尺寸公差的上限提供了一個對象，或者在下面探討了其他因素。然後，設計人員檢查是否已放置了外殼中的所有對象，並且對象之間的間隙是否能夠避免在存在設計的所有環境和用戶體驗下對象之間的所有干擾。檢查以確保物體可以直截了當的方式組裝到外殼中，並確保產品的服務宗旨得到維護。該設計已準備就緒，可以進行設計評審過程。查看時，卷（或對象）之間的間隙是以下功能：

- 加工公差：給定的外殼可以指定為公稱尺寸。但是，當供應商按照標準尺寸允許的外部極限來製造時，會導致外殼略大（或更小）。
- 冷卻要求：某個組件可能必須與另一個組件保持最小距離，以使該組件不會受到無法承受的熱影響。在某些散熱情況下，必須將組件放置在盡可能近的位置（彼此連接）。
- 組裝和維修要求：由於組裝或拆卸組件所需的間隙，組件之間可能需要一定的空間。
- 產品（選件）的將來添加：計劃添加或產品選件可能需要一定數量。

回顧我們的初衷，要找到距牆壁 0.100 英寸的物體，當我們進入詳細設計時，我們必須小心這個 0.100 英寸的標稱間隙（如右圖所示）。上面關於公差的討論是因為該距離很容易從 0.100 英寸縮小到 0.100 減去 0.025（= 0.075 英寸）（在最壞的情況下）。當然，也可以增加到 0.100 加 0.025（= 0.125 英寸）。在“草圖”設計階段，我們不會關注此尺寸。同樣，隨著設計進入原型開發階段，它將變得更加重要。在 0.100 英寸尺寸

上的所有上述集中旨在說明在對象（在這種情況下，是對象 和牆壁）之間設計了一定距離。在大多數設計中，必須使物體的整體尺寸最小。這導致大多數設計有至少對象盡可能之間可能距離。使總體尺寸（和所產生的重量）最小化的設計示例包括計算機外殼，咖啡機或其他家用電器。我們生活在一個較小的世界中（通常）等於：

- 重量更輕（更好地節省燃料或易於使用）
- 較小的生態足跡（節省材料）
- 在空間有限的情況下節省空間
- 降低成本（對於消費者或生產者）

在某些情況下，它不是所需的最小距離。諸如散熱或機械耦合（例如在齒輪傳動中）的複雜性肯定會影響物體之間的距離。在示例中，我們一直在簡化設計過程。因此，對於我們的物體與牆壁之間 0.100 英寸距離的示例，設計人員實際上將面臨挑戰，即確定該最小距離是多少（例如，如果該距離為 0.050 英寸，則我們的整體產品可能會更小）。這個距離會進一步縮小嗎？

（請記住，我們在此距離上產生了 0.025 英寸的不確定性。）在設計的草圖階段，準確確定該距離可能並不重要。在證明了的利益總在一個非常快的人為 NER 設計，設計者可以使這個距離 0.125 英寸和進入的 *reduc*-荷蘭國際集團這個距離細節的設計證明了一些成功。壁厚通常是以下功能的函數：

- 產品操作所需的強度
- 產品的重量限制
- 製作工藝

壁厚不必一定是恆定的，也就是說，壁厚可以通過添加肋或角撐板或可以允許厚度局部變化的製造方法而變化。

2.4.3 對象排列示例（圖 2.3）

到目前為止，在我們關於定位兩個對象（一堵牆和一個對象）的討論中，我們僅用二維簡化了討論。在本節中，我們將擴展為三個維度。讓我們進一步介紹對象排列的示例。讓我們看一下在機櫃中定位兩個對象的幾種方法，看看我們有哪些選項。出於本示例的目的，假設兩個對象都是磚（字面上是磚），其近似尺寸為：

- 2.5 英寸厚
- 3.5 英寸寬
- 8.0 英寸長

在我們的 2D 示例中，我們將忽略厚度，而僅使用 3.5×8.0 的寬度和長度尺寸。因此，我們基本上有一個 3.5×8.0 的矩形。（我們將進一步回到 3D 示例，因為這為我們增加了更多選擇。）請參見圖 2.3。現在，讓我們說設計的基本出發點是將兩個磚頭，即磚頭 A 和磚頭 B（均具有相同的尺寸）容納在一個封閉空間中。在開始時，我們沒有以下限制：

- 外殼的整體尺寸或形狀
- 外殼材料成本

圖 2.3 最佳對象放置

我們可以輕鬆地設想（至少）五種不同的方式來相對於磚 A 和磚 B 定位，從而產生截然不同的外殼。當然，有超過五種不同的方式，但是我選擇了標準的笛卡爾磚排列，其中磚彼此平行或對齊。讓我們看一下這五個不同的佈局，並評論一下為什麼一個佈局可能比其他佈局更具優勢。磚塊 A 和磚塊 B 之間假定一個恆定的 1 英寸，磚塊和牆壁（側面，頂部或底部）之間假定一個相同的 1 英寸間隙。

- 版式 1：沿著寬度並排放置磚 A 和磚 B
- 佈局 2：磚 A 和磚 B 沿長度對齊
- 佈局 3：L 形的磚 A 和磚 B
- 版式 4：T 形的磚 A 和磚 B
- 版式 5：堆疊磚 A 和磚 B（3D 版本-這是唯一使用三維的版式）

現在，讓我們分析這五個佈局。（對於所有佈局，我們假設外殼的外觀非常薄，實際上使外殼的寬度、長度和高度增加了零。此外，我們將忽略外殼可能具有的圓角，而僅假設正方形角

落)。

- 佈局 1 似乎是最簡單的佈局，以機櫃的相對方形結尾。所得的機櫃高度為 $10 \times 10 \times 4.5$ 。六個邊（面積）為 $2 \times (10 \times 10) + 4 \times (10 \times 3.5)$ 。
- 佈局 2 是長，而不是正方形。這種類型的外殼可能具有獨特的應用，例如更好地利用辦公桌空間。最終的外殼高度為 $19 \times 5.5 \times 4.5$ 。六個邊（面積）為 $2 \times (19 \times 5.5) + 2 \times (19 \times 3.5) + 2 \times (5.5 \times 3.5)$ 。
- 佈局 3 可能更適合轉角應用程序。結果是 $(5.5 \times 10 \times 4.5) + (5.5 \times 9 \times 4.5)$ 。八個邊（面積）為 $3.5 \times (4.5 + 9 + 10 + 4.5 + 5.5 + 14.5) + (9 \times 5.5 \times 2) + (10 \times 5.5 \times 2)$ 。
- 版面 4 與版面 3 相似，但外觀更為對稱（與版面 3 相同的體積和相同的周長）。
- 佈局 5 提供最小的“平面圖”，但導致最高的佈局。最終的外殼高 $10 \times 5.5 \times 8$ 。六個邊（面積）為 $2 \times (10 \times 5.5) + 2 \times (10 \times 8) + 2 \times (5.5 \times 8)$ 。

這些簡單的佈局說明即使放置兩個對象（在這種情況下為兩個磚塊）也代表了 很多可能性。如果添加第三個對象或不同大小的對象，您會發現這變得相當複雜。有時，一個對象相對於另一個對象的放置是有根本原因的，因為一個對象的入應該靠近另一個對象的出（嵌套對象）。無論如何，讓我們繼續討論上面五個佈局 的一些相對優點。在佈局之間進行選擇可能會有基本的美學原理。也就是說，可以選擇佈局 1，因為它被認為更直接（更實際），並且有可能佈局 3 被認為更有趣。因此，佈局 的選擇可以歸結為客戶將找到的營銷決策。如何優化（最小化）外殼的表面積哪種佈局導致最小的表面積？同樣，外殼在其側面、頂部和底部都圍繞著這兩個磚塊。有關對象佈置的一些結論 如果要最小化重量，則佈局 1 最好，因為重量主要歸因於外殼的周邊區域。（磚塊在所有佈局中的重量都相同，空氣可以忽略不計。）如果要最小化體積，則佈局 5 是最好的。這對於尺寸受到限制的某些設計可能是有利的。佈局 2、3 和 4 的體積相同。最大的外圍區域是佈局 2。迭代的佈局 6（未顯示）將是一個球形的外殼。半徑為 6 英寸的球體可以容納 Layout 5，從而得到大約 900 立方英寸的體積，而僅具有大約 450 平方英寸的周長也許是創造性的解決方案？顯然，隨著添加更多對象，優化對象的體積和周邊區域將變得更加困難。設計 師的獨創性是在給定的佈局區域中嵌套各種幾何對象。可以使用各種技術來優化佈局的緊湊性。一旦確定了機櫃中的所有對象，設計 人員就可以對這些對象建模並開始將它們放置在以下方向上：

1. 有效利用空間。
2. 將需要彼此靠近的物體放置在盡可能近的位置。這可能是由於機械，熱或電氣 原因造成的。例如，如果電纜連接了兩個對象，則使這兩個對象盡可能靠近可能 是有利的如何通過將（對象 1）（直接）連接到對象 2 來消除電纜？
3. 放置需要彼此保持盡可能遠的距離的物體。同樣，可能存在機械，熱或電氣方 面的原因。應該注意的是，佈局 3 和佈局 4 的生產（製造）可能更加複雜。非對稱外殼可 能比直壁更難製造。如果外殼是工具，則不一定如此。（模製或鑄造）產品。但 是，如果外殼是金屬板，則多餘的外壁會給製造帶來更多問題。

關於 3D 設計的注意事項 由於我們設計的所有對象實際上都是 3D 對象，因此實際上我們需要進行 3D 設計。快速的 2D 草圖可以解決部分設計意圖，但是在設計移至 3D 時需要顯示所有細節。這使得 CAD 工

作對於當代設計界要求的精度和速度至關重要。通過創建所有對象的 3D 模型，可以檢查間隙並使其易於更改和優化。機械設計師如何看待印刷電路板組件（PCBA）就是一個例子。它基本上具有安裝在印刷電路板上的許多組件的 2D 佈局。但是，所有這些組件都處於不同的高度，因此 PCBA 上方和下方的間隙在許多區域會有所不同。因此，PCBA 雖然最初被認為是 2D 區域（處於草圖階段），但其厚度卻使其成為 3D 體積。

本章小結 本章將我們帶入一個只有想法的設計的起點。它向我們展示如何將這個想法轉變為物體並在空間中放置，從而使我們對該想法進行物理上面的實現。首先，我們著眼於起點並定義設計的邊界我們從什麼開始？什麼是設計的邊界？我們必須定義客戶所需的產品。我們看到了設計從修訂版 1 到修訂版 X 的過程，其中 X 是提供我們認為是客戶所需的設計。最後，我們看了看如何最佳放置設計中需要解決的單個對象來滿足客戶需求。需要權衡取捨，我們必須意識到我們如何確定這些權衡之間的最佳選擇。

第三章考量結構問題 在前面的章節中，我們定義了什麼是成功的設計，然後繼續確定將要在設計中放置的對象的位置。現在，我們將討論設計的結構性考慮。為什麼在這個時候考慮結構方面的考慮，為什麼不考慮散熱方面或用戶界面呢？可能僅是因為我具有機械工程背景，所以我自然地首先看到了設計必須如何結構合理。我覺得我們必須建立在堅實的基礎上，以便設計的其餘部分可以以此為基礎。電子外殼（本身）當然是一種結構，必須足夠堅固，才能在客戶（用戶）使用產品的各種環境中工作因此，我們首先討論提供這種堅實基礎的主要考慮因素。本章將重點介紹：

1. 利用各種材料強度來提出結構解決方案
2. 定義通用流程已考慮電子外殼結構設計
3. 看一些例子來闡述一般概念，我們將以標題為獎金部分的部分結束本章，句尾最後一部分的意思是，給我們的材料強度問題增加了一些複雜性，並且展示除強度之外的其他考慮因素對我們的設計的影響。

3.1 簡介：材料強度 本章並非回顧材料或機械工程強度的所有原理。整個教科書僅涉及壓力，應力和外力，因此我們只會稍稍提到表層知識並著重在電子元件外殼設計上。在這些電子外殼的設計過程中，對結構透徹了解對於設計的整體成功至關重要，讀者無需獲得機械工程學位或成為材料強度方面的專家即可從本章中受益。我希望能夠修改一些基本原則，無論他們位在何處都足以為 EPE 設計師帶來價值，相信設計師對材料基本強度的理解越多，外殼設計就越好。例如，EPE 設計人員可以使用 1/8 英寸厚的鋁作為外殼材料來設計外殼。測試可以證明 1/8 英寸厚的鋁確實通過了衝擊和振動測試。但是對於設計的厚度和材料選擇，這裡有一些問題要問：

- 我們可以使用 1/16 英寸厚的鋁代替嗎，這樣可以節省重量，可能更容易製造？
- 我們可以使用 1/8 英寸厚的塑料代替嗎，減輕重量並可能更容易製造？

因此從上述問題中可以看出，僅解決問題是不夠的，我們需要以盡可能最具成本效益的方式解決問題，在第一章開始時，我們將詳細介紹最具成本效益的方式，但就目前而言，我們將集中精力確定在結構上至少成功的合適設計。設計師對電子外殼設計的最大貢獻之一就是數據，證明該設計

將結構性地適應 客戶產品環境的嚴苛要求，希望無論讀者無論你的背景為何，能提出一種足以通 過環境測試的電子外殼。設計適用於電子外殼的結構的基本方法分為四個基本方法：

1. 看一下已經存在的類似產品，並使用已經設計好的解決方案作為手頭設計 的快速起點。這種方法的優點是速度快，但是缺點是您的設計可能會因 為缺乏創造力而無法解決特定產品應解決的獨特問題。
2. 快速的粗略計算設計。這種方法在簡化的結構元素上使用了一些基本的 設計方程式。我們將在本章稍後探討這些設計方法的一些示例以及一些 示例問題。
3. 更複雜的分析在 Sect 中對此進行了更多探討。

3.3 關於需求分析

同樣 對於需要複雜分析的設計，本文不會涵蓋很多內容，在本章中要強調的是對設計的結構元素的感覺，以及對改進的設計進行一些快速修復。

4. 過度設計-過度設計並不是所有設計的正確答案，在上面使用 1/8 英寸鋁 的解決方案示例中，我已經談到了這一點，在下面討論另一個過度設計的 示例，在競爭激烈的產品市場中，客戶主要根據價格做出購買決定，過度 設計可能會導致產品成本增加（或者肯定會增加重量和尺寸）。結構上的 過度設計基本上是從一個非常有可能成功通過結構測試的設計開始的，也 就是說要在客戶使用環境中免受衝擊和振動的影響就可以通過。過度設計可以說很多，EPE 設計人員可以確定 18 規格（0.048）厚金屬的支架 將勝任，但是選擇 16 規格（0.060）厚的金屬，增加支架的厚度會給人一些舒 適感，而原因有以下幾個：

1. 該設計將承受高度未知的某些作用力，這將在 Sect 中進一步探討，

3.2 關於設計過程

2. 在設計中只有一個大於 1.0 的安全係數，安全係數等於 1.0 意味著您的設 計僅符合設計標準，本節涵蓋了有關提高安全性的設計考慮因素的討論。本有關於安全係數討論在本章 3.2。同樣在設計中放置 0.060 厚的金屬可能出於經濟原因。例如如果大多數設計 已經是 0.060 厚，並且如果支架可以用一塊廢料製成，則可能會節省成本。在上面的示例中，很有可能使用 0.048 厚的金屬並添加一些簡單的肋或彎曲將使 設計比 0.060 厚的金屬堅固得多，這就是作者為何花的時間在 Sect 中顯示的問 題中探討了在設計中添加肋骨的問題。

3.2 結構設計過程

我想給讀者一個通用的過程來設計電子外殼（或外殼中的單個零件），以滿足設 計的結構性考慮，通過完成這六個步驟，設計人員應該準備好提出可以使用的材 料和橫截面，以下按小節分別介紹這六個步驟。

3.2.1 相似設計

業內其他設計如何處理類似情況？其他設計可能來自您自己公司內部的範例（過去的產品），也可能來自您自己公司外部的競爭產品。

3.2.2 分力

確定作用在物體上的力（靜態和動態）-這些力的幅度和方向，通常電子外殼中，零件的自重不會考慮靜態力，但會考慮動態力，在本文中我指的是物件、零件和 構件，但是它們都應該被考慮在內完。

3.2.3 現有結束條件

確定對象的最終條件，即對象的移動自由度以及如何支撐該構件，常見的最終條 件是固定（不允許移動）或自由（允許旋轉），最終條件會影響確定負載將產生的應力大小。

3.2.4 建議材料和橫截面

確定支撐這些力所需的材料和橫截面組合（來自第 3.2.2 節），請牢記強度是 材料固有的方面（因此材料的屈服強度

越高，則材料的屈服強度越高)。 材料所具有的更大的承重能力)，並且力會在這些材料中產生應力。所有材料都有最大 應力極限，在這種極限下不是開始變形（屈服強度），就是出現完全破壞點（極 限強度）。 構建中最大應力通常由 $\sigma = Mc / I$ σ 是構件中的最大應力。 c 是纖維到彎曲軸的距離。 I 是慣性矩物體的橫截面積的特性。 M 是橫截面中距施加力最遠的最大力矩，就是力乘以它從端點條件到施加力。基本上，最初只有兩個選擇來設計更高的承重構件（因為術語 c / I 既與橫 截面積有關，又與該區域的分散遠離彎曲的中性面有關）

- 更換材料從而更改應力極限，因此選擇具有較高應力極限的材料可以在該構件 上施加更多的載荷。
- 更改材料的橫截面屬性，基本上是更改成員的第二面積矩（也稱為慣性矩 I ），以及可以集中遠離該構件的中性軸或質心的面積量。
- 面積的增加從根本上提高了成員承載更多貨物的能力。
- 遠離該構件的中性軸增加該面積也將有助於該成員承擔更多的負載（這就是為 什麼 I 型梁的許多橫截面都遠離該中性軸的原因，中性軸是在承載構件上有良好 的表現）。在圖 3.1 中已經說明了更改材料和橫截面之間的相互關係，在這裡我們有一種 非常常見的負載情況，一種作用力作用在構件的端部，而構件具有固定的端部狀 態，我們將展示材料和橫截面（或兩者）的各種變化如何解決問題，基本問題是 找到一個足夠堅固的構件以承受 2000 磅的載荷，EPE 設計者的任務是確定構件 的材料和橫截面，以使構件中的最大應力低於特定材料所允許的最大應力（例如 降伏應力）。因此，我們可以從上方利用方程式作為起點設計： $\sigma = Mc / I$ 我們可以計算出最大力矩 M 等於 48 英寸×2000 磅，然後我們將其稱為 96,000 英寸磅（對於我們選擇的任何材料和橫截面，該值都將相同）。松木其降伏應力為 1200 pounds/in³(psi) 鋁 CR H-18,降伏應力為 22000psi 讓我們保持簡單的矩形形狀，其慣性矩值為（對於任何一種材料）： $I = bh^3 / 12$ 當 b 是構件的寬度， h 是構件的截面高度而在此示例中， c （即從極端光纖 到彎曲軸的距離）將為 $h / 2$ ，因此方程式為 $\sigma = Mc / I h = (96000 \times (h/2)) / (bh^3 / 12) = 576,000 / bh^2$ （注意:該構件中的應力取決於該構件的高度平方，這突顯了對高長寬比（高 寬比）橫截面的需求。）

圖 3.1 材料和橫截面選擇

3.2.4.1 PineWood 解決方案 讓我們嘗試設計由松木製成的構件，通過輸入： $b = 4$ 英寸和 $h = 12$ 英寸，我們看到最大應力將為 1000 psi，該構件（松木，橫截面為 4×12）的應力極限為 1200 psi，其負載僅為 1000 psi，我們已經過度設計了該構件（安全係數為 120 %）。現在，EPE 設計師需要考慮其他設計約束（例如重量或成本），以決定這種 松木樑是否適合用作我們的電子外殼。劇透警告：我們將討論確定第 1 章中任何零件的材料選擇的 15 個注意事項。在圖 4 中，但現在，僅將重量作為材料和橫截面最終選擇的另一個考慮因素。讓我們看一下松木樑的重量 30 磅/英尺 3 樑 40 磅。

3.2.4.2 鋁溶液 設計就是要提出一些合理的選擇，所以讓我們看一下鋁梁，我們可以選擇， $b = 4$ 英寸， $h = 2.5$ 英寸。我們可以看到最大應力為 23,100 psi，這高於鋁的最大 屈服應力，因此在我們的設計中這在結構上不能令人滿意，但是要記住，

樑的高 度是我們計算慣性矩時更大的要素， $b = 2.5$ 英寸和 $h = 4$ 英寸？這將與鋁樑的 前一個示例的橫截面面積相同，現在最大應力將為 **14400 psi**，遠遠低於該鋁的 最大 **22,000 psi**，因此旋轉相同的橫截面，其中較厚的方向是在加載力的方向 上，這種材料和橫截面的選擇在結構上是成功的。讓我們看一下鋁樑的重量。 **169 磅/英尺³** 樑為 **47 磅**。相比之下松木為 **40 磅**。總之，我們研究瞭如何使用兩種不同的材料（松木和鋁）來解決結構問題。我們可以為每種材料開發橫截面，以解決結構問題，在設計中變形通常與強度同 等重要，負載構件可以具有足以承受特定負載的強度，但是它可能會偏轉超出工 程材料彈性的不可接受的量。本章還將在一些示例中顯示一些問題，其中還考慮了撓度（以及材料的彈性 模量 E ）。上述選擇（更換材料或改變材料的橫截面）的經濟性給 **EPE** 設計人員帶來了 一個有趣的問題，材料和橫截面積的許多組合都可以使用，但是必須做出適合項 目總體目標的選擇，除功能外它還必須滿足項目目標的成本，可製造性、風險、 重量、上市時間等。這些選擇將在第一章開始時進行進一步研究，可能需要對替 代解決方案進行審查，測試和原型設計，設計師可以帶給設計的最大資產之一就 是快速找到要選擇的合乎邏輯的選擇在可行的材料/橫截面選擇候選材料中解決 的問題。

3.2.5 合併功能

可以將正在設計的零件與組件中與該零件相鄰的另一個零件組合嗎？可以 將兩個單獨的部分（預想的）合併為一個部分嗎？這在圖 3.2 中表示。查看正在組合的零件的另外想法方面是實際上要從一個（設想的）單個零件 創建兩個單獨的零件，此舉可以降低總體成本，降低組合設計的解決方法，而對 於候選材料 /橫截面解決方案，主要選擇之一是確定如何在生產中製造該解決方 案。例 如：該項目的工具預算是多少？項目是否可以負擔得起用於鑄造、注模、擠 壓 或其他可能正在考慮的製造技術的資金？有沒有可以利用的現有工具？必須 確定找到工具解決方案的投資回收期。如：1.加工費用。 2.需要多少個零件（在產品使用壽命內）。 3.未加工零件將花費多少。 4.工具零件將花費多少。確定工具解決方案的投資回收期，例如如果加工的成本為 **50,000 美元**，而 未加工的零件成本為 **10 美元**，而加工零件的成本為 **1 美元**，則每件零件可節省 **9 美元**，因此工具零件為工具支付 $50,000 / 9 =$ 大約，**5500 個零件**，如果預計一年內將售出 **5500 個零件**，那麼投資回收期將為大約 **30 天**。參見前面有關工具 收支平衡的討論

- 設計中是否可以使用現成的或先前設計的解決方案？這可以節省工具成本，並 且這種新用法的數量增加（當舊用法結合使用時）將降低單件成本。

圖 3.2 組合（或分離）零件以改善設計

- 在項目過程中可以逐步採用製造技術嗎？也就是說我們可以在原型/第一生產 階段（例如 **CNC 銑削**）中使用一種製造技術，然後在第一生產之後切換到工具解 決方案（例如鑄造），在這種情況下，將逐步降低成本，並且不會在短期內（而 是在更長的時 間內）節省費用

3.2.6 確定所需的安全因素

確定安全因素的檢查，也就是說必須知道以下答案：

- 如果零件失效，是否有人受傷？生命，金錢和時間上無法預測的失敗的代價是 什麼？
- 該特定部分在產品整體功能中的重要性如何？如果

這部分失敗，那麼整個產品 是否會失敗？ •對力的了解程度如何（根據以上 3.2.2 節）？我們是否知道“誤差線”，即力 會偏離假定的名義值多少？ •確定所選設計（材料或幾何形狀）的關鍵方面，以及如何在生產中指定，認證 和檢查它們？做筆記以確保將執行這些步驟（認證/檢查）。 •在設計的各個階段都需要確保最終設計足以將其交付給生產中的客戶。 •將有一個優化的解決方案，通常可以通過分析設計的主要組成部分並確定設計 中弱鏈接的位置來找到，這可以通過利用一些測試方法來發現，這些方法通過在 超出環境限制的條件下進行測試（例如高度加速的壽命測試，HALT）來誘發故障， 通過首先確定可能發生故障的位置，然後通過測試設計原型，可以生成數據來確 定某些段是否接近其設計極限。如過在設計過程中，上述步驟沒有已知答案，設計師將面臨： •進行進一步查詢以獲得更好的信息。 •進行設計，設計人員在設計過程的一開始就幾乎不了解零件的所有作用力和相互關係的情況，當然設計人員可以列出所做的假設以及必不可少的其他信息也可 以設計零件，對零件進行原型設計並在它們需要發揮作用的條件下對其進行測試， 用以解決這種前進設計難題的幾種方法不知道所有信息就可以採取 其中： 設計 1 的重量為目標重量的 110%，但在結構上成功的可能性為 95%，設計 2 是目標重量的 100%，但有 75%3.2 結構設計過程在結構上成功的機會，因此 設計 1 比目標重量高 10 %，但是從結構的角度來看，無法達到設計目標的風險 要低得多。 因此折衷是優化設計所需的時間，當然該產品必須從結構的基礎上起作用。 在程序一開始就很難確定設計中的裕度，在不了解所有信息的情況下繼續進行設 計具有基本設計的價值可以測試，希望可以在較短的時間範圍內修改基本設計， 以便在獲得其餘信息時繼續執程序。 我們可以通過過度設計零件來快速前進，或者花更多時間勉強滿足所有要求。 下面對這兩個路徑進行了進一步的研究： A：過度設計零件-這種方法可能保證零件在測試中在結構上起作用，這裡的想法是，隨著測試揭示出節省材料和減輕重量的適當位置，可以迭代回到一個不太保 守的設計，這種方法至少在項目測試階段的早期就使設計滿足結構功能要求的機 會最大化，但是為了使這些零件更接近極限結構成功而對設計進行的重量更改將 需要時間（和金錢）來重新測試設計以驗證更改，大多數項目在迭代方法上獲得 有限的時間來獲得完美設計的零件。 B: 設計零件時要花費更多的時間，使其僅勉強滿足重量和強度的要求，因此， 這種策略與過度設計（上方）不同，因為零件的設計有（幾乎）沒有工作的可能， 例如如果節省空間和減輕重量在產品要求列表上最高，則可能需要一種設計，該 設計從結構強度因素勉強可以接受，但可以節省更多的材料和重量，這種方法試 圖平衡“風險和回報”並應徵得設計團隊的同意，通過這種設計，可以實現材料 和重量的目標，但是這種設計在結構上無法正常工作的風險從 5%降至 25%，因 此“B”設計路徑顯示出更高的風險，即不滿足產品的結構強度要求，但可以滿 足產品的重量要求。 C: 上述兩種方法的混合可能是合適的，也就是說設計的某些部分將是保 守的， 而設計的其他部分將更具風險，這也許可以使總體風險承受能力成為整

體設計的一部分，經驗豐富的設計團隊將了解設計中的最佳位置，以打開接受度。

3.3 需求分析

當然在電子包裝設計中，有許多設計需要進行最嚴格的分析，在任何競爭激烈的產品設計領域，結構考慮因素將最大程度地利用給定的技術，使公司的成功機會最大化，如果產品具有以下特徵則需要最高程度的分析：

- 如果要生產成千上萬個特定單元，則每單位節省一美元可以帶來可觀的總節省，節省大量成本的分析會由於大量生產而帶來大量總體利潤，但是如果只生產幾個單元，則大大降低了節省的潛力，並且一旦設計被認為是可行的，就不會在降低成本方面進行大量投資帶來可觀的節省。
- 由於要放置產品的環境，因此需要高度的安全性，例如運輸、公用事業、醫療或教育行業的產品，所有客戶都需要擁有安全操作的產品。
- 對客戶至關重要的任務，這通常包括軍事、航天局或政府所需的產品。

請注意過分設計以致降低公司的盈利能力是沒有任何理由的，設計師和工程師應該時刻警惕降低成本的可能性，零件的減少可製造性的設計以及整體設計的優雅，導致了產品的領導地位，只有在設計的第一階段才能最大程度地降低成本，隨著設計甚至進入原型階段，為降低成本而重新設計的成本開始呈指數級增長，關於這一方面的更多內容將在第 6 章組裝和可維修性中介紹。另外關於安全的注意事項也是重要的，在安全性很重要的任何領域，都不能為產品設計不足的藉口，保險商實驗室（UL）和其他安全機構當然會出於安全考慮對電子設備進行認證，也就是說安全機構將獲取產品（規格和工作單元），並對其進行審查和測試，大多數電子產品當然是在全球範圍內銷售的產品，都必須通過嚴格的代理商批准認證。關於這方面的更多內容將在第 10 章設計安全中介紹。首要的設計考慮因素仍然是並且永遠是功能，即零件必須按預期發揮作用，如果零件在負載下會失效，那麼它的外觀或生產的優雅程度都無關緊要，這是設計人員必須了解載荷的主要原因。

使用有限元分析（FEA）的現代分析軟件解決方案非常普遍，在 Google 上進行的搜索顯示了一些入門資料，例如：

A: 有限元分析，麻省理工學院的 David Roylance 將其三個主要步驟描述為：

- 預處理，其中要分析零件的模型將幾何圖形劃分為多個離散的子區域或元素，而這些子區域在稱為節點的離散點處連接。
- 分析，其中將預處理器準備的數據集用作計算應力和位移的線性或非線性代數方程系統的輸入。
- 後處理，以圖形方式顯示結果以幫助可視化結果。

B: 線性分析，由 MIT 開放式課件 MIT 的 K. J. Bathe 教授撰寫，該視頻系列是一門綜合性研究課程，介紹了用於實體和結構線性分析的有效有限元程序。

C: 有限元分析，H.J. Qi 博士將 FEA 流程描述為：

- 制定物理模型，即將（可能是簡化）實際的工程問題描述為 FEA 可以解決的問題
- 通過離散化實體，定義材料屬性並應用邊界條件來使用 FEA 模型
- 選擇適當的近似函數，制定線性方程式，並求解這些方程式
- 以數字和視覺格式獲得結果

毫無疑問，使用 FEA 可以為涉及結構分析的工程問題（以及固體力學，動力學和熱分析）提供很多有用的信息，該分析得出的任何答案都應首先使用簡化的模型和力來測試以查看答案是否有意義，應該使用測試來驗證所做的假設和結果答

案。使用 FEA 分析的另一個屬性是，設計中的細微變化也可以輸入到分析中，以查看結果如何變化，通過這種方式可以非常迅速地顯示如何使設計更好，一些公司規模足夠大可以將整個部門專門用於 FEA 分析，而其他公司則希望設計人員能夠自己使用 FEA 分析結構。

3.4 結構問題：靜載荷

同樣由於本文並不打算涵蓋所遇到的所有各種結構性考慮因素或問題，因此我想強調一些突出以下內容的問題（將其保留為三個）：

- 可以認為是個體的問題，即載荷和力施加到要設計的單個構件上，或者是整體結構，即可以是整個（組裝）結構的分析。
- 許多單個零件（或子裝配體）的供應商會在自己的文獻中提供設計指南，這些指南肯定可供單個設計師使用，這些信息大部分基於多年來獲得的經驗和分析經驗，提醒設計人員了解背景和限制-
- 有關任何此信息的說明。以圖形或表格格式顯示的某些信息植根於基本原理，但這可能並不明顯，這種可用的供應商數據類型的一些示例是塑料、密封件、EMI 組件和軸承（僅舉幾例）的設計結構考量。

電子機櫃中成員的靜態載荷是由於：

- 1.構件的體重。
- 2.其他成員施加的載荷
- 3.由於熱效應，殘餘應力等引起的負載

靜載荷會通過施加力而導致構件失效，從而導致：

- 1.超過材料的屈服強度
- 2.構件的過度偏轉導致構件執行以下操作：

設計意圖的一面。由於所有載荷都會產生一定的撓度，因此必須在設計中的某個時刻知道允許構件產生多少撓度。動態加載將在 Sect3.5 中介紹，動態負載通常是隨時間變化的負載而靜態負載在相對較短的時間內不會發生顯著變化，電子外殼設計中常見的一些動態載荷是重複載荷衝擊載荷和能量載荷，能量負荷是指用衝擊期間傳遞的能量（比作用力）更容易表示。重複載荷造成的斷裂通常稱為疲勞故障，而振動可能會導致疲勞失效。以下三個問題通常涵蓋的主題是：

- 1.什麼是光束（相對於平板）？
- 2.應力公式和最大應力。
- 3.撓度公式和最大撓度。
- 4.截面模量。
- 5.彈性模量。
- 6.結束條件。
- 7.負載條件。
- 8.最壞的情況下加載。
- 9.組合加載。

3.4.1 懸臂梁分析（摘自 Tecknit EMI 屏蔽產品手冊）

大多數電子外殼應力分析可以通過計算簡單梁來表徵，但是首先讓我們定義一個光束，Roark 和 Young 對梁撓曲公式的應用做出以下假設：

- 樑的長度必須與深度成比例，對於金屬梁跨度/深度比應為 8 或更大，對於具有相對薄板的梁則應為 15 或更大。

Byars 和 Snyder 是一個很好的例子，如圖 3.3 所示，確定法蘭正下方的 A 點處的主要法向應力和剪應力，假定彈性行為並忽略壁上的任何應力集中。

圖 3.3 懸臂梁分析 解決方案：梁左端的彎矩為： $M = (80,000)(2)(12) = 1,920,000 \text{ in-lb}$ 垂直剪切力為： $V = 80,000 \text{ lb}$ 因此，A 點的彎曲應力為： $\sigma = My / I = (1,920,000) (6.5) / 1073 = 11,630 \text{ psi (tension)}$ A 點的橫向剪應力為： $T = VQ / It = (80,000)((10)(1)(7)) / (1073)(0.5) = 10,440 \text{ psi}$ 處於這種壓力狀態的莫爾圓給出： $\sigma_{\max} = 17,750 \text{ psi (tensile)}$ $\sigma_{\min} = 6,130 \text{ psi (compression)}$ $T_{\max} = 11,940 \text{ psi}$

（當考慮問題中的彎曲應力和剪切應力時，使用莫爾圓來求總應力）但是請注意在這樣短的構件中，其橫截面薄（跨度/深度比 = $24/15 = 1.7$ ）則撓曲公式的有效性值得懷疑，例如剪應力和法向應力的數量級相同，另外要應用正確的

跨 度/深度比，此樑的長度必須在 19 英尺的數量級上。 以上示例的重要性在於強調了橫向剪應力對最大應力的影響，在確定樑的最大 應力時，除非用盡所有可能的組合，否則對結果不滿意彎曲應力和剪切應力可以 提供最大的主應力，通常剪切圖和彎矩圖的構造以及彎曲應力和橫向剪切應力的 數量級比較將大大簡化問題。 使用上面示例中的一些梁應力公式，我們將繼續解決電子外殼設計人員可能面 臨的問題的主推力，那就是確定蓋板到外殼底盤的（最大）緊固件距離（C）。這 種類型的問題涉及環境密封提供的外殼（請參閱參考資料 6）

- 防止灰塵，濕氣和蒸氣
- 足夠的 EMI 屏蔽

我們將在第 9 章中討論問題的屏蔽部分，目前我們將解決設計基本密封設計幾 何形狀方面的結構性問題，以保持足夠的強度以提供防潮密封，以下內容將引用 《Tecknit EMI 屏蔽產品手冊》中的某些材料，注意這裡我使用的是手冊中的一些參考資料，即使如此在 Google 搜索時代，對於設計師來說這是非常有價值的 信息來源，這些手冊中有許多是精裝本，可以從原始設備製造商處獲得以用於設 計其特定組件，現在許多設計指南信息都可以在線獲得（而不是精裝手冊中提供）， 零件製造商的銷售人員是了解當今設計師可用的各種指南和在線信息。 現在，回到這個環境密封問題的結構考慮：

- A. 密封材料：稍後在第 7 章產品環境（密封）中介紹
- B. 覆蓋層和底盤材料：此處涵蓋的彈性模量（稍後在第 4 章材料和過程討論 了腐蝕。
- C. 截面積（需要慣性矩）。
- D. 螺栓間距。
- E. 壓縮停止。

3.4 結構問題：靜載荷

在 Tecknit 手冊中，通過使用方程式（其中 C 是螺栓之間 的間距）解決了（大約） 緊固件距離問題。 基於以下三個假設：

1. 墊圈寬度 = 蓋板寬度。
2. 最大壓力（由墊圈施加）等於最小壓力的三倍（由墊圈施加）。
3. 最小壓力為 20 psi。

比較鋁製外殼（與鋼製外殼）： 對於鋁板（ $E = 1 \times 10^7 \text{ psi}$ ）。 對於 $\Delta H = 0.01$ 英寸，一個合理的墊片撓度，而 $t = 0.125$ 英寸， $C = 4.0$ 英寸 對於鋼板（ $E = 1 \times 10^7 \text{ psi}$ ）。 對於 $\Delta H = 0.01$ 英寸，一個合理的墊片撓度，而 $t = 0.125$ 英寸， $C = 4.0$ 英寸 關於方程式（和答案）的其他一些觀察結果是：

1. 我們看到，鋼製外殼的螺栓間距大於鋁製外殼的螺栓間距—這意味著較硬的材 料可以減少撓曲。鋁板每 4 英寸需要一個螺栓，而如果我們使用鋼作為板材，則 每 5.2 英寸需要一個螺栓。
2. 我們看到螺栓間距隨著厚度的三次方而變化—我們期望方程式（用於螺栓間距） 可能基於梁的慣性矩，從而得出厚度的立方體函數。
3. 我們希望螺栓間距是 $1/4$ 功率的函數，這是梁在其長度上具有均勻載荷的撓曲 的通用方程，該樑的撓度是其長度到四次冪的函數。對於載荷均勻的梁，相同的 一般方程式也將根據其材料彈性模量（E）向 $1/4$ 屈光力（ $3 \frac{1}{4} = 1.3$ ，即 $= 78.5 / 60$ ）偏轉。 因此，作為設計者我們首先要估算 4.0 英寸的螺栓間距（對於鋁製外殼設計）， 顯然我們可以（並且應該）在設計中對此間距進行原型設計，並在盡可能真實的 條件下進行測試，值得注意的是我們還假設了墊片密封面積的橫截面面積和墊片 厚度隨墊片的變化而變化：

- A. 未壓縮狀態（在擰緊緊固件之前）。
- B. 壓縮狀態（將緊固件擰緊以設置設計中的止動件後，也就是說緊固件附近的設 計特徵會特別限制墊圈，使

其免受過度壓縮的結構考量，所有墊圈都需要這些止動件，以使緊固件具有指定的壓縮極限。我們還可以查看類似的設計，其中防護等級（空氣或水）與我們的設計相匹配。如果我們發現 4.0 英寸適用於這些設計，那將使我們充滿信心，我們肯定有成功的機會，還應該注意的是總體設計的因素之一就是要有最少數量的緊固件，因此緊固件之間的 5.0 英寸距離將比 4.0 英寸的距離更好（從而節省了緊固件並節省了擰緊這些緊固件的工作量），但是 4.0 英寸的間距將增加墊圈設計在計算以外的其他負載（例如衝擊或熱）時密封的可能性，從而為設計提供一定的安全餘量。

3.4.2 撓度公式和最大撓度（來自鑄造雜誌）另一種說明應力、撓度、慣性矩和面積之間關係的問題由一種方法表示，該方法允許設計人員確定肋板與相同基礎厚度 W (W) 的無肋板相比的應力和撓度比。圖 3.4，這個問題將指出在設計中添加肋的重要性（並且容易），該肋將大大增加截面的強度，這樣的肋條很容易在注塑成型工藝，鑄造工藝甚至標準鈹金設計中添加，圖 3.4 顯示了兩個圖表，對於標有應力比（肋骨/未肋骨）的圖表，縱坐標是應力比而橫坐標是肋骨高度/基部厚度，該圖顯示了將肋添加到平板時最大彎曲應力如何變化，每條曲線代表特定的肋骨間距比標記為 01 的曲線代表間隔很寬的肋骨，而其他曲線則具有更密集的肋骨間距，標記為撓度比的圖表與此類似，並顯示了標記為 01 的曲線，表示間距非常大的肋骨。參考中提供了更多詳細信息。

程序 1. 計算等效基礎寬度， $Beq = B / N$ ，其中 Beq = 等效基準寬度 B = 板的總寬度 N = 肋骨總數

2. 計算肋骨尖端厚度， $t = T - 2H (\tan a)$ ，其中 t = 尖端的肋骨厚度 T = 底部肋骨的厚度 H = 肋骨高度 a = 肋骨每側的拔模角

3. 計算等效基礎截面的截面積， $Ar = BeqW + H ((T + t) / 2)$ ，其中： Ar = 等效基礎截面的截面積 W = 基部厚度

4. 計算從極端光纖到中性軸的距離， $Y = H + W - (3Beq W^2 + 3Ht (H + 2W) + H (T - t) (H + 3W)) / 6Ar$

5. 計算等效基礎截面的慣性矩 $I_r = (4BeqW^3 + H^3 (3t + T) / 12 - Ar (H - Y))$

6. 計算無肋的等效基礎截面的慣性矩， $I_o = (BeqW^3) / 12$

7. 計算肋板應力與無肋板應力之比， $S_{ratio} = 2 (I_o / I_r) (Y / W)$

8. 計算肋板撓度與肋板撓度之比， $Y_{ratio} = I_o / I_r$

圖 3.4 帶肋板與不帶肋板 在無肋結構上增加肋骨將增加該結構處理更多載荷的能力，通常可以通過在常規壁厚上增加厚度來增加強度，例如： $\sigma = Mc / I$ 其中 σ = 考慮中的構件的應力 M = 該成員的最大力矩（通常是力乘以距離的函數，即從力到該成員截面的距離） $I / c = Z$ ，這是所考慮截面的屬性，也稱為截面模量 c = 從構件的中性軸到外部光纖的距離 I = 力矩的轉動慣量（大約重心）因此，要增加成員的承載能力，您可以：增加 I 和/或減少 c （增加 Z ）或是矩形的 I （矩形是預製構件的常見選擇）。其中 b = 矩形底部的長度， h 是矩形的厚度。注意，由於平方函數，增加厚度（ h ）具有很大的影響。因此將厚度增加一倍實質上會使光束強度提高四倍，上面所述將厚度增加一倍會使（標準橫截面的）構件的重量增加兩倍，對於重量敏感型設計（在電子外殼行業中最普遍）而言這可能是災難，但是通過添加肋骨肋骨是厚度的間斷性添加，強度顯著提高（而重量僅少量增加），設計人員可能

會驚訝地發現添加肋條實際上會增加最大應力，為什麼是這樣？儘管肋條增加了板的整體慣性矩，但對於短 肋條從中性軸到橫截面（c）的極限纖維的距離可以更快地增加。對於間距較大的肋骨，此效果最為明顯。讓我們回到計算 S_{ratio} （無肋骨和單肋骨設計的最大允許應力比）的七個步驟，這是一個非常簡單的肋骨添加，其中肋骨不是錐形的，即 $T = t$ ：板的寬度（B）= 1 英寸 單肋骨，肋骨高度（H）= 0.375 底座厚度（W）= 0.125 英寸 $W_r = 0.0.125 / 1.00 = 0.125$ 肋骨高度/基礎厚度 = $0.375 / 0.125 = 3.0$ 因此在設計中增加了肋，使截面強度提高了約三倍，《注射成型雜誌》（文章還比較了帶肋/無肋截面的撓度比。

3.4.3 另一個撓曲問題，這一次是扣合鉤（摘自 Mobay 設計手冊，塑料扣合接頭）這個問題是機箱設計師在設計常用功能卡扣配合時面臨的一個很好的例子。卡扣接頭是連接兩個不同部件的非常簡單，經濟且快速的方法由於這消除了將兩個部件連接在一起的緊固件，因此非常頻繁地使用它，該設計利用了其中一個零件（鉤）的突出特徵，而另一零件則包含孔（或底切）。這裡的想法是，鉤在連接操作過程中短暫偏轉，並卡入底切以完成配合操作。選擇此介紹性問題是因為：

- A. 顯示一種通用的緊固方法（用於塑料）。
- B. 顯示了使用材料共同強度的公式，該公式利用了材料的彈性特性，在設計中將撓度用作優點，並優化了橫截面積和均勻應變。
- C. 介紹了使用塑料材料進行設計的某些方面。
- D. 利用供應商提供的文獻資料（在本例中為 Mobay Plastics）。代替使用第一性原理解決一些更複雜（至今）的問題，使用列表選項和列線圖可以大大減少所需的設計時間。該計算示例針對的是矩形橫截面的卡扣鉤，其厚度從鉤的根部的 h 不斷減小到鉤的端部的 $h/2$ （請參見圖 3.5）。因此，這是設計類型 2（請參見參考表）。總體設計目標是用最少的材料實現最大的變形。

鑑於：材質=聚碳酸酯 長度（l）= 0.75 英寸 寬度（b）= 0.37 英寸 底切（ y ）= 0.094 英寸 傾斜角（ α ）= 30° 找：厚度（ h ），在最大厚度處（ y ）會導致允許的 $1/2$ 應變。從表中（對於聚碳酸酯）， ϵ （允許）= 4%；因此， ϵ （允許）= 2%。從表（2 型設計）撓度 P 從表（力方程）從聚碳酸酯的圖表（ $\epsilon = 2\%$ ）， $E = 264,000 \text{ psi}$ 配合力（ W ）表中的摩擦係數（PC 對 PC） $\mu = 0.50 \times 1.2 = 0.6$ 。從圖中可以看出， $(\mu + \tan \alpha) / (1 - \tan \alpha) = 1.75$ 對於 $\mu = 0.6$ 和 $\alpha = 30^\circ$

圖 3.5 卡扣-安裝鉤 3.5 動態負載 電子外殼中構件上的動態載荷是由於以非穩態方式承受在構件上的載荷引起的。它們包括但不限於：

- A. 具有振幅和頻率的振動載荷（包括與地震地面運動相關的風力或慣性力）
- B. 離散衝擊載荷將在第一章中探討考慮這些振動和衝擊載荷情況的一些問題。

關於產品環境的第 7 條。章節總結 在本章中，我向 EPE 設計器介紹了一些基本考慮因素-外殼的結構注意事項。我們可以通過為這些外部船體提供材料來開始這種設計。同樣，我們的設計處置將是選擇船體的橫截面。這些橫截面和材料的最佳選擇是利用易於獲得的材料方程式的強度來進行的。但是，在各種解決方案中都需要做出選擇，並且要確定最佳設計，不僅要單獨考慮結構，還需要更多考慮。此外，我們還介紹了一種用於設計電子外殼結構的通用過程。這首先

要看先前 的設計，確定結構上的力，然後繼續確定我們的安全係數。設計，從那裡開始， 我們看了一些說明設計結構中常見問題的示例，我們以一小節結束了有關其他復 雜性和注意事項的簡短內容，作為第四章的介紹。 第四章材料與工藝 現在我們已經有了設計的結構基礎，我們實際上將從回歸基礎開始本章。 我們已經滿足了定義然後符合產品規格的需求，但是現在我們將回到設計的成本考慮。通過重新設計試金石，我們將繼續使用更多的構建基塊， 設計師可以使用這些構建基塊來確定其外殼零件的最佳材料和工藝。選 擇組成組件的各個零件的材料和工藝將使設計人員還考慮產品的組裝和 維修（請參見第 6 章）。 4.1 成本與時間對規格 本章將從回歸設計的基本考慮開始，即強調成本（最終）是決定在設計 過程中做出選擇的決定因素（最終）。電子外殼的設計師在設計中面臨一定的實用性，因為設計的規模必須確 保公司所有者的財務成功。某些設計將被認為是一次性的，在這種情況 下，成本方面的考慮並不那麼重要，但是想解決那些將生產至少數百個 裝配（零件）的設計。我曾在一個實驗實驗室工作過，該實驗室只能生 產一個組件，但是同樣，我將不討論這種情況。在一次性的情況下，例 如太空衛星，成本甚至可能極其重要，但是失敗的成本可能會主導設計 原理。在安全或公共衛生方面也是如此。 讓我們進一步探討上述費用注重設計。在某些情況下，需要開發最終設計 所需的原型。這些原型是當然對成本敏感度較低，因為時間通常是這裡的關鍵因 素。但是，即使原型本身可能不具有成本敏感性，但總的來說，項目成本會受到 影響，因為僅在項目的原型部分中為了速度而犧牲了成本，因為節省了時間（高 成本、原型可以縮短產品的測試和批准生產時間，通常可以降低總體成本（對於 該項目）。舉一個例子，最初認為設計的某些方面是最重要的，但實際上成本才是第一要 考慮的問題。如果公司選擇美學，即產品對顧客的外觀和感覺作為第一考慮因素， 那麼這就是在市場上表現的方式。選擇美學決定的實際上是一個選擇，說這些產 品將以這種外觀銷售更多。因此，產品開發團隊在美學上的投資實際上將為公司 帶來更多的利潤（相對於產品較少強調美學）。因此，當在以上各段中提到成本時，也可以將其視為獲利能力或（利潤增加），即較低的成本等於較高的利潤。 時間在這個成本圖中扮演了非常重要的角色。上市時間可能是產品開發的巨大 推動力。就是說，如果某個產品沒有在特定的時間範圍內發布（例如春季播種季 節或節假日前的電子展覽），則可能對產品的總銷售額產生巨大的影響。這樣， 耦接成本是時間的方面。這導致某些情況可能會在產品的生命週期中發揮作用， 例如： 1. 重視時間在材料/過程/製造性的選擇的早期開發過程的各個階段。 2. 可能會在生產過程中出現“高產量”和降低成本的產品發布開發過程的後期 所有這一切實際上仍要歸還成本，因為（由項目管理人員）可以確定通過兩階 段產品發布（如上所述）將總成本降至最低。從產品發布之初到產品壽命結束的 總銷售額將通過這種方法得到提高。本章的工程經濟部分探討了項目所需工具的 概念以及所需的工具階段。本也可以細分為多個時間範圍，例如： 1. 開發成本（直到首次交付給客戶為止） 2. 產品的持續

生產成本：材料/組裝/間接費用。 3. 生產後的服務和保修成本。 4. 報廢成本（例如回收）。所有加在一起的成本構成了總成本—因此僅在一個產品階段中最小化成本並不會使總成本最小化。成本不僅與單個零件或組件的成本有關，還與開發（設計）成本有關。成本仍然是該項目的第一推動力的另一個示例是需要使重量最小化以使產品成功的項目。通過以下邏輯對此邏輯進行合理化（針對此組合方案）：

1. 產品規格明確指出：
 - 項目交付所需的時間（預期）
 - 產品成本
 - 產品重量目標（難以實現）
2. 產品設計。迭代#1 導致超出重量目標。
3. 設計是迭代的；迭代#2 導致（略微）超出了體重目標。
4. 此時已超過分配產品的時間。
5. （由項目管理人員）做出以下決定：
 - A. 接受迭代 2（不同於原始規範）
 - B. 繼續迭代 3，並在指定的時間長度內完成並註明已超過原始交貨時間

上述問題的根源在於最小化重量，但是解決方案實際上是時間問題（時間等於 成本）。需要將項目預算超支的成本與產品運輸的需求進行權衡。因此，同樣，由於時間與成本有關，產品設計師必須在設計思維空間的最前沿具有這兩個相關的項目方面（時間和成本）。這兩點加上規格的符合性（達到或超過），構成了成功設計的綜合方法。如果遇到任何問題/挑戰，設計師必須始終提出以下要求：

1. 設計的驗收標準是什麼？（我怎麼知道我成功了？）這通常是規範的形式，可以是正式的或非正式的。設計應該努力使接受標準正式化，以便對項目團隊完全透明。
2. 以美元計算的設計預算是多少？
3. 與整個產品相關的各個部分的項目進度表是什麼，進度表的關鍵路徑是什麼？如果估計完成任務的時間太短（剩餘時間不足），則必須盡快建議其他解決方案，例如獲取更多資源。進度表的詳細信息應指出每個耗時的活動，包括向前推進所需的設計審查和所需的潛在問題解決時間（第二次迭代設計）。以上所有內容對於選擇以下內容非常重要：
 - 各個零件的材料。
 - 生產上述零件所需的過程。
 - 組裝上述零件所需的組裝程序。
 - 測試上述零件和組件所需的測試程序。
 - 制定質量控制程序，以確保零件和組件的生產和組裝符合規範。
 - 滿足服務（預期或意外）要求。

這將在 Chaps 中反復出現 4 和 5，所以我只將代碼成本（Chpt4）放在文本中（如果需要，讀者可以參考此一般性討論作為複習內容）。圖 4.1 注射成型-模具示意圖 4.2 設計師的思維空間

設計師必須先思考、面對設計電子外殼時，希望設計師可以同時想到一些事情 成本（Chpt4）。我認為以下這些問題在設計師的腦海中是永恆的，這就是為什麼我用術語設計師的思維空間來描述這些永恆的問題的原因：

- 多大？
- 完成目標需要多少部分？
- 是否曾經做過（或稍作改動）？在這裡，還是在另一家公司？競爭如何實現產品目的？
- 什麼是用戶界面，即客戶將如何使用該產品（按鈕/顯示器/燈/門/電源/輸入和輸出的連接）？
- 我正在設計產品的這一部分，我不負責的其他部分是什麼？
- 我多快提出一些解決問題的想法？我可以多快為這些創意製作原型以檢查創意的可行性？我還能集思廣益批評這些想法嗎？
- 一旦對想法進行了審查，並且原型似乎可以正常工作，則設計的哪些部分包括：
 - 風險最大（可能無法按預期工作）？
 - 最簡單？
 - 零件的預生產過

程中最長的主導項目，即在項目完成的關鍵路徑中有哪些零件？對於原型，它與生產版本有多接近？哪些測試將確定原型是成功還是失敗，並且需要幾輪原型製作（每輪可能更接近於生產版本）？項目團隊需要多少個原型？什麼時候？如何將項目進度或設計問題傳達給設計團隊的其他成員？誰需要在那裡進行設計審查？

4.3 材料和工藝選擇

設計人員設計完零件後，必須確定要生產該零件的“最佳”成本（Chpt4）方法。每個部分要確定的一般項目是：

- 零件的材料。
- 零件需要的表面處理（請參閱下一節）。
- 零件所需的尺寸精度。
- 生產零件的過程（也許是用於早期需求，原型設計和零件預生產的過程，以及用於零件成熟生產的不同過程）。
- 零件所需的數量（例如，每季度，每月，每年）。
- 零件需要的第二次操作（超出精加工）。
- 零件的成本要求。
- 該部分可以與設計中的另一部分組合嗎？從本質上講，需要確定的是單個（組合）部分是否可以滿足各個部分的功能（成本（Chpt4））。
- 零件可以做成對稱的（為了便於組裝）嗎？應該把幾乎對稱的部分做成一個更明顯的非對稱部分嗎？這兩個問題涉及該零件的組裝以及以不正確的方式組裝的可能性。可以僅為使零件對稱而在零件上添加孔或缺口（多餘的）。

確定零件的材料選擇的注意事項：設計者應選擇滿足（達到或超過）的材料：

- 1.強度要求。
- 2.重量要求。
- 3.可靠性要求。
- 4.法規要求。
- 5.安全要求。
- 6.熱要求。
- 7.屏蔽要求（EMI / RFI）。
- 8.金屬的兼容性要求（電腐蝕）。
- 9.彈性要求（硬度計）。
- 10.導電（或絕緣）要求。
- 11.不透明要求。
- 12.磨損要求。
- 13.美學要求（觸摸、視覺）。
- 14.聲學要求。
- 15.紫外線（UV）透射和阻力要求。

來看幾個例子，看看如何確定上述 15 個要求（成本（Chpt4））。示例 1：手機（外部）外殼對於材料的選擇，我想到了兩個主要的候選對象。它可以是金屬或塑料。可以使用以下符號滿足 15 個要求：

- 1.金屬將提供足夠的 EMI 屏蔽，但可能難以製造。型體必須光滑、美觀，這對於金屬的製造來說是昂貴的，甚至連鑄件也可能需要許多勞動密集型的二次加工（例如機加工或磨削）。
- 2.塑料（注塑成型）足以減輕光滑度和優雅度標準，但需要額外的 EMI 屏蔽方案。必須對塑料外殼進行金屬化處理，需要在塑料外殼下方的設計中添加另一個非美學部件以用作 EMI 屏蔽。還需要調查塑料的一些安全問題。塑料外殼作為外部零件的修整成本可能要低得多。
- 3.如果重量和尺寸是一個因素，則應更仔細地檢查金屬和塑料，以查看哪種更好。通常可以在塑料設計中添加肋條以增強強度。
- 4.散熱問題可能是選擇材料的一個因素。塑料將充當絕緣體（保持熱量），而金屬將內部產生的熱量帶到環境空氣中，從而降低外殼環境溫度。但是金屬外殼摸起來可能會太熱。

參考文獻中相當準確地顯示了計算材料的等效剛度（或剛度）。其中（取決於溫度的品質）： $T1 = ((E2 / E1) \times T2^3)$ 的立方根 = 材料 1 的厚度 $E1$ = 材料 1 的彎曲模量 $E2$ = 材料 2 的彎曲模量 $T2$ = 材料 2 的厚度

計算塑料（例如 SABIC Cycolac）與 0.03 英寸厚的鋁製零件的等效厚度：

$$T_{\text{plastic}} \text{ 立方英寸的根} = ((100/4) \times (0.03)^3) = 0.088 \text{ 英吋}$$

計算出與 0.03 英寸厚的鋁零件等效的鈦厚度：

$$\text{鈦} = \text{立方根}((100/160) \times (0.03)^3) = 0.026 \text{ 英吋}$$

現在，如果

查看強度（以上所有均為等效強度）與重量之比（查看厚度與密度 之比）： 塑料= $0.088/0.04 = 2.2$ 英寸²/磅 鋁= $0.030/0.10 = 0.3$ 英寸²/磅 鈦= $0.026/0.16 = 0.16$ in²/ 磅 因此，如果重量（對於同等強度）而言是個問題，那麼鈦（比鋁或塑料）將是 更好的選擇。這就是為什麼鈦被廣泛用於飛機的原因（成本（Chpt4））；但是 鈦具有一些固有的製造困難，這使其作為電子外殼的選擇非常昂貴。關於塑料模製的討論在以下子章節中。此處不會決定將金屬與塑料用於外殼的 外殼。為了進行更深入的分析，已經提出了足夠的歧義，我們需要繼續進行材料 選擇的另一個例子。Apple 5s 手機殼由（機加工）鋁製成，而後來發布的 Apple 5c 手機殼則由塑料製成。將該塑料製成符合 EMI 的標準，在某些區域增加了金 屬化塗層，在其他區域增加了金屬屏蔽層。人們認為塑料版本更容易在襯衫口袋 中彎曲，但不足以阻止銷售。與不需要模製塑料相比，加工鋁是更容易推向市場 的選擇，因為不需要較長的交貨時間工具。另外，由於加工零件比成型零件更容 易做出更改，因為修改工具和測試新更改需要更長的時間。同樣，每種設計對於 材料和工藝選擇可能都是唯一的-這是機械工程師（與公司中的其他團隊合作）可以對整體產品設計做出的一個例子。在塑料和壓鑄件之間的最佳選擇需要仔細分析所有產品要求。鋁、鎂、鋅和鋅鋁壓鑄件通常在要求強度、剛度和最小包裝空間的電子外殼中 優於塑料。通常消除了對插入的螺紋緊固件插入的需求，它們的導熱性通常消除 了對冷卻風扇的需求，這在電池供電的便攜式電子設備中至關重要。對於要求強 度和剛度以及在高溫下工作的中型到大型裝飾部件，壓鑄也優於塑料。EMI 和 RFI（電磁干擾和射頻干擾）屏蔽是壓鑄件所固有的，因為它們是金屬。塑料零件需要一層金屬屏蔽層以符合 EMI / RFI 要求。這些屏蔽附加塑料部件（油 漆，塗料，樹脂填料，金屬屏障，多層化學鍍鎳）可能會出現性能問題和質量控 制問題。在承受連續壓力（特別是在高溫下）的設計中，鋁壓鑄件通常比塑料更容易選擇，而諸如鑽頭之類的手動工具則需要最小的重量，剛度和良好的表面質量。鎂 壓鑄件經常在要求最小重量、強度、剛度和最小包裝空間的應用中選擇。用於高 速打印機的組件，需要最小重量的堅固性；需要安裝功能，高質量表面和耐衝擊 性的外殼；裝飾性裝飾件通常通過鎂合金壓鑄生產。承受連續載荷的塑料部件（例如用於環境密封的部件）通常需要金屬沖壓件的 支撐以提高剛度和抗蠕變性。另外，應該指出的是，即使是簡單的材料（例如鋁），在工程圖中實際指定也 要複雜得多。存在許多等級和合金的鋁，無論是普通還是異乎尋常，本文都不會 解決這種複雜性，只是說應特別注意實際指定材料的特定等級。選擇一個年級高 於另一個年級是該特定年級的成本（Chpt4）能力的函數：

- 1.具備設計的 14 個特徵（如上所述）。
- 2.可供任何供應鏈成員使用以達到交貨時間。
- 3.採用指定的質量控制措施，以可重複的方式製造。例如，如果我希望零件由不銹鋼製成，則需要考慮的物品是：

- 1.在鉻鎳不銹鋼（奧氏體）和直鉻不銹鋼（馬氏體）之間選擇。鉻鎳不銹鋼為 20X 型和 3XX 型。例如，類型 302 是：

- 基本的 18%Cr。分析表明，在常溫下，鎳含量為 8%，

對許多有機和無機酸及其鹽類具有優異的耐腐蝕性。 •在高溫下具有良好的抗氧化性。 •可以通過通常用於碳鋼的所有方法輕鬆製造。 •Cr-Ni 等級在完全退火的條件下是非磁性的，並且不能通過常規熱處理硬化。

2. 必須考慮材料的候選人（選擇）的可用性。在此示例中，對於不銹鋼，通過檢查諸如 Ref 之類的參考。類型 302 尚不可用。庫存有 304、309、316 和其他類型（來自大量不銹鋼庫存 Ryerson）。例如，ASTM-A240 型 316 型（冷軋，退火，酸洗，2B 和 3 精加工。規格：QQ-S-766）可提供 16 號（0.060 厚）×30 英寸×96 英寸尺寸的不銹鋼板。

3.在選擇材料時應考慮製造技術。如果設想將零件在主軸機床（車床或銑床上）上車削，則需要考慮自由加工等級。如果要焊接零件，則各種等級的可焊性可能非常高，也可能不一定。

4.像往常一樣，可以根據經驗利用有關材料選擇的信息從：

- 個人的組（或其他公司資源）中的代碼簽名者
- 供應鏈製造商

一旦選擇了材料，就必須對其進行充分規定，即要明確規定，以便在零件規格上明確。通常使用某些標準（例如 ASTM，MIL 標準（美國政府））或國際標準（例如 ISO / IEC）來指定材料和表面處理。還必須採用某種確保方法（通過標準質量控制程序）的方法論，以確保所指定的材料是要製成最終零件的材料。

示例 2：LED 燈罩 舉一個材料選擇和思考過程的例子，這個過程將使人們在候選材料中做出合理的選擇。對於需要透明的（光學透明的）覆蓋 LED 的零件怎麼樣？可以設想這部分是扁平的，不需要太多的結構強度，基本上可以支撐其自身的重量，並防止用戶用手指或鉛筆戳 LED。現在將其命名為“LED window”。該部件將密封 LED（防潮），並且通常不可更換（必須在不維修的情況下延長產品使用壽命）。設計師應該想到的直接問題是成本（Chpt4）：

1.將要生產多少，零件生產的時間表（原型/預生產/生產）是什麼，以及總價是多少？成本通常不會在設計中預先指定，也就是說，可能有些歧義，例如盡可能便宜。隨著設計的進行，設計中的某些選擇可能會增加零件的成本，因此，權衡其他選擇通常會有所幫助。

2.它的設計是否適合裝入凹槽或從外殼突出？窗口距離 LED 多遠？這些是設計的一般幾何問題。窗口的美學考慮因素是什麼？

3. LED 發出的光穿過該部分。是否需要擴散來自 LED 的光-我們在美學上想要什麼樣的外觀？這部分在整體設計中的外觀如何？是一直在用戶視圖中還是僅在偶爾出現？清除是正確的顏色選擇，還是需要其他顏色（紅色/綠色/琥珀色/藍色）？LED 發出的光是什麼顏色？

4.從以上特性出發，通過對材料的 15 項要求。例如，該零件（目前是非金屬零件）將如何對 EMI 屏蔽要求產生不利影響？這可能會導致新零件盡可能小，從而為 EMI 形成最小的孔。

5.LED 窗如何組裝到外殼上？是否可以在沒有任何額外硬件的情況下進行組裝？組裝的選擇可能是使用超聲波、膠帶或粘合劑將零件粘合到位。

6.總體設計中是否有多個（不止一個）窗口？尋找這些窗口的通用性。

7.材料選擇（有一些問題可供選擇）：

- Lexan 塑料：是模壓還是切割而成？如果是模製的，我們可以看到模具流線嗎？如果從薄片上切下，它可能會是平坦的（沒有其他幾何特徵），而模製允許添加設計特徵（例如超聲焊

縫)。多厚 是否有防刮擦或防眩光的要求(如何解決)? 如果是模製的,窗戶可以在外殼製造商處組裝到外殼上嗎?塑料將具有一些安全考慮,例如有燒傷危險或邊緣鋒利。•玻璃:最硬和最堅硬的材料候選者,可能是最昂貴的成本(Chpt4)。•作為標籤一部分的聚酯薄膜:通常小於 0.010 英寸厚。標籤可以在外殼上包含其他信息,包括識別 LED 的功能。8.保證將任何細節呈現給項目團隊。這可能是價格/時間估算,原型或草圖,然後進行材料的設計選擇。

4.4 飾面和塗層 選擇材料時所做的所有選擇(先前的選擇)都直接與該材料的表面處理選擇關聯。幾乎所有工程部件都需要表面處理。對此會有一些例外,例如雕塑(藝術品)或旨在腐蝕(並具有腐蝕外觀)的建築立面。設計師將指定兩者的材料和拋光,以他們設計的每一個部分。面漆(包括廣義的塗料)必須:

- 1.延緩腐蝕(從製造商,組裝商到客戶)或在倉庫中腐蝕客戶的最終使用權。
- 2.當金屬與異種金屬接觸時,提供陽極保護。基於此,接觸的異種金屬必須具有足夠的防電腐蝕的保護。這是通過插入惰性材料或與每種材料兼容的材料來實現的。下表按組列出了相似的金屬。一組材料與同一組另一種材料之間的接觸應視為相似。相反,每當不同組的材料緊密接觸時,就會設定一個關鍵的電解階段(僅要求濕度作為試劑)。(當未保護的鎂或鋁與不同族的任何其他金屬接觸時,這尤其不利(表 4.1)。)表 4.1 物料組 請注意鉛、錫以及實際上所有精加工材料的使用都具有非常嚴重的環境問題。各種立法法規和法律禁止或限制了許多此類材料。請參閱 RoHS 要求,作為這些國際法律的示例,這些法律限制了上述一種或多種飾面的使用。
- 3.外觀(美學)。
- 4.對於鍵合連接,實際上將省略(遮蓋)保護塗層。對於此類區域,必須通過強制通風或充分密封來防止水分進入。飾面通常列入三種主要類型:

- 化學:那些由金屬表面上的化學反應產生的表面處理。
- 電鍍:由在電解作用的基礎金屬上沉積的膜或板組成的表面處理。
- 有機:由在基材上的有機塗層組成的飾面,通常通過刷塗,浸塗或噴塗的方式進行塗飾。可以通過以下方式施加塗層:

- 噴塗金屬:將薄薄的一層金屬噴塗到表面上有幾個目的。示例是用於腐蝕和耐熱性的鋁或用於導電性的銅。
- 粉末噴塗:一種干塗工藝,其中將粉末顆粒直接塗覆在要塗覆的表面上,而無需使用溶劑或水。使用熱固性或熱塑性粉末。零件在室溫下被靜電噴塗,然後加熱到粉末的熔點以上,以獲得熔融的表面光潔度。
- 電沉積:可以電沉積薄塗層,以改善外觀,提高電氣質量並提高耐磨性,耐腐蝕性或特定環境的耐受性。
- 陶瓷、金屬陶瓷和耐火材料:固定的搪瓷玻璃料和耐火材料用作耐腐蝕塗層,還具有吸引人的色彩和裝飾效果。
- 熱浸:這些塗料主要用於鋼,鑄鐵和銅,可提供低成本的耐腐蝕性能。使用的材料是鋁、鋅、鉛、錫和鉛錫。
- 浸入:除少數例外,這些塗料可用於大多數黑色金屬和有色金屬。使用的材料是鎳、錫、銅、金、銀和鉑。用途示例包括導電性,便於焊接和釺焊。
- 擴散:當基材與粉末或溶液接觸時,通過加熱產生這些塗層。大多數擴散塗層旨在獲得堅硬且耐磨的表面並提高抗腐蝕性。
- 蒸氣沉積:這是將蒸氣化的金屬沉積在真空室內,然後在該處冷凝在所有冷的表

面上。大多數金屬和非金屬都可用作要塗覆的基礎材料。例如鏡子和光學反射鏡、金屬化塑料、鏡片塗層和儀器部件。

- 有機物：由醇酸樹脂、纖維素、環氧樹脂、酚醛樹脂、有機矽、乙烯基、橡膠 等組成。
- 化學轉化：這些化學塗層可與賤金屬發生反應，形成表面結構，從而改善塗料 的粘合性、耐腐蝕性、修飾性和耐磨性。磷酸鹽、鉻酸鹽、陽極和氧化物塗層很 常見。
- 防銹：這些油、石油衍生物和蠟會形成一層可抵抗侵蝕的膜，主要是來自工業 和海洋環境。通常會在（零件）文檔中使用 MIL 規範（MIL SPEC）交叉引用來標註將應用 於工程材料的面漆或塗料。之所以這樣做，主要是因為大多數（普通）表面處理 都已經過標準化，並提出了現有規範：

- 1.節省時間，因為已經存在普遍接受的標準。
- 2.供應商已具備這些流程，可以經濟地生產這些流程完成。
- 3.可以使用可接受的原位檢查表面光潔度（由指定者驗證）質量控制程序。

例如，根據 MIL-C-5541 可以要求鋁的化學膜符合化學膜。 材料和飾面的工程文檔標註示例如下：

- 材料：16 Ga（0.060）1010 CRS（CRS 代表冷軋鋼， 1010 代表 AISI M1010 鋼的簡寫）。AISI M1010 鋼是一種低碳，通用的商用級鋼、具有經濟性、可塑 性和可焊接性。
- 表面處理：按照 QQ-Z-325 鍍鋅板清除鉻酸鹽。第二類、第二類（QQ-Z-325 是 鋅的常見 MIL SPEC，並且具有類別和類型特定選擇的屬性，例如最小厚度）。油漆是金屬最廣泛的飾面之一。繪畫可能是一個非常複雜的過程。遇到困難的原 因是：
- 表面處理
- 顏色匹配
- 識別和控制缺陷

工程文檔中的材料和表面處理標註應明確說明。最好查看您的公司通常如何召 集這些常見的材料和飾面，並與供應商聯繫，以了解標註如何適合他們的流程， 以及用於保證材料和飾面的質量控制程序是什麼將由供應商和即將到來的（到您 的工廠）檢查來處理。有時，這是通過供應商提供給來料檢驗的材料/表面認證 來處理的。

4.5 沖壓和成型金屬

近年來，金屬沖壓、開槽、成形和彎曲的基本過程發生了變化。（非 CNC 的）車 床、銑床和鑽床等舊製造技術已被貶低為車庫車間或急轉彎原型車間。現代製造 是在 CNC（計算機數控）多軸機床或高速帶式沖床上進行的。您的 CAD 文件將通 過電子方式傳輸到車間，車間將文件轉換為製造機器的輸入，然後機器創建零件 （以指定數量）。脫模沖床將一塊扁平的沖床壓入，並在旋轉刀塔（預裝）上放置圓形沖頭、矩 形沖頭（用於切割外圍）以及幾乎任何形狀的沖頭。滑塊所在的工作台在 x 和 y 中移動，轉塔旋轉以放置適當的打孔器。只需幾分 鐘，就可以用複雜的設計完全沖壓出一塊扁平的金屬。沖孔並形成百葉窗的專用 沖孔也可以在剝離板上進行編程。公差可以通過 CNC 進行非常嚴格的控制，因為 沒有手動設置刻度盤，停止或機器進給/速度。在當今的製造環境中，多軸主軸機床是司空見慣的。術語 5 軸通常是指 CNC 機床同時在五個不同的軸上移動零件或工具的能力。3 軸加工中心在 2 個方向（X 和 Y）上移動零件，刀具在上下（Z）上移動。5 軸加工中心可以在另外兩個旋轉 軸（A 和 B）上旋轉，這有助於切削刀具從各個方向接近零件。與所有製造技術一樣，設計者對機器和機械加工過程越熟悉，設計的成本就越 高（Chpt4）。在附錄中包含了有關

鈹金實踐的部分。這些顯示了鈹金製造商使用的非常常見的彎曲和沖壓金屬的方法，並且通常在公司製圖標準手冊中找到。

4.6 模塑塑料 電子外殼的設計

者必須對塑料成型過程以及如何設計塑料零件具有紮實的知識。大多數工程學學位並沒有過多地強調這項技能，因此很可能在工作中獲得併磨練。關於塑料零件的正確設計的文獻很多，我將提供有關該主題的一些很好的參考，其中很多來自（原始顆粒的）塑料供應商本身。多年來，塑料供應商自身已經在使用樹脂方面學到了很多東西，每個人都可以從中分享經驗。另外，由 Glenn L. Beall 撰寫，可以被視為聖經，因為 Beall 先生是該領域的知名專家。將提供塑料設計十大準則的清單，但這只是每個設計師可以添加的廣泛清單的重點。塑料零件設計人員可能的 #1 能力是了解將用於其零件的模具，並了解注塑模具可用的選項。在了解了注射成型工具的情況下，以下六個概念將有助於注射成型零件的設計：

1. 拔模的想法需要將零件從模具中彈出。
2. 將塑料注入到模具中的主澆口（或澆口）的位置。對於零件所需的要素，此澆口位置（以及隨後的脫膜需求）將是一個很大的考慮因素。澆口可以在模具的邊緣或型芯（反向澆口）或型腔側進行。
3. 模具流動的概念需要很好地理解。突出了對圓角的需求，通常具有相等厚度的設計以及對肋骨高度的限制。隨著熔體冷卻，它從粘性液體變成半固體，最後變成固體部分。填充距零件澆口最遠的零件區域比較困難。
4. 再次顯示脫膜的位置，突出了鑄件表面的需要。
5. 如果零件需要底切，則模具將顯示如何進行加工，達到的效果（以及使模具複雜化的程度）。
6. 模具中所示的模具分型線反映了零件設計從而顯示出這些設計的困難。

以上工具設計功能是從經驗中學到的。在所有情況下，零件設計都需要由工具設計人員（通常是模具製造商簽定的合同或與承包商簽訂合同）進行審查，並且零件設計人員應確保其設計能夠以簡單的方式成型。零件設計和工具都需要設計者和項目管理團隊認真審查，因為模具具有：

1. 大量的資本支出（K\$）
2. 交貨時間很長（他們需要數週才能完成）
3. 困難的（時間和金錢）修訂過程

模製塑料零件的最大優點之一是，與製成類似金屬零件相比，它只需較少的第二次操作即可製成成品零件。通常模製塑料部件不需要在外部進行彩繪。大多數（客戶可見的）塑料零件最終在外部具有模壓紋理，通常是通過以紋理圖案蝕刻模具來實現的。請注意這種模具紋理會在零件上產生底切（這是通過向零件添加少量拔模來實現的）。模製零件需要一些常用的第二種操作（這些操作是在模製操作之外完成的，通常是由模塑商完成（或由模塑商外包））：

1. 在模具本身認為不可行的零件上需要的孔或切口-有時更容易通過第二次操作添加孔，而不是將其作為模具的一部分進行加工。因此，可以增加鑽孔或攻絲操作。
2. 如果門位於裝飾區域，則可能需要機加工以修復標記。如果澆口區域不是裝飾性表面（並且該表面不需要機械加工），則也可以手動移除澆口。
3. 插入件（金屬，螺紋緊固件）可通過超聲波方式放入零件（或這些嵌件也可以模製在內）。
4. EMI 屏蔽層可應用於塑料部件。這採取各種形式：•繪畫 •電鍍 •金屬屏蔽層的粘接
5. 粘接操作（超聲波或膠粘劑）可熔合一個或多個模製零件

一起。 6.可以進行各種裝飾（絲網印刷，繪畫）。模內可以進行操作以這種方式合併圖形。 7.必須明確確定上述任何操作所需的所有夾具，進行成本核算，並製定合理的時間表。需要在成品文件中清楚地標出上述所有第二項操作，其中應包括任何質量控制可接受標準。這些第二次操作會以非常重要的方式增加零件的單價，因此它們需要成為整個設計過程的一部分，並由設計者清楚地呈現出該設計的替代方案。需要與製模商深入討論第二種操作，以確保以最經濟的方式可以實現。零件的塑料選擇：設計人員必須查看先前列出的 15 種特性（對於任何材料），以決定選擇哪種樹脂。蠕變數據（長期粘彈性行為）對塑料也很重要。其他一些獨特方面包括：

- 1.成型工藝有很多：注射成型/吹塑成型/壓縮成型/熱成型（壓力或真空成型）/反應注射成型（RIM）。我主要講的是注塑工藝。
- 2.卡扣配合要求在應力與應變方面具有特定限制的材料。
- 3.存在與塑料顆粒供應商共同選擇塑料的數據。這些供應商還可以審查設計，並可能指出您的應用程序是否需要定制的解決方案。供應商擁有大量的材料和成型信息。正如之前的承諾，這裡是我對正確的塑料零件設計的十大建議。大多數設計都可以通過內部或成型商處的模具填充程序進行分析。這些程序採用設計，所建議材料的 CAD 幾何數據，並確定適當填充模具的優化過程：

- 1.必須盡一切努力保持壁厚均勻，較厚的區域可能會導致被稱為下沉的外觀缺陷。具有較大吸水深度的肋骨會導致壁厚部分，肋骨的底部與主壁相遇（這會限制肋骨的高度）。這也是螺釘凸台常見的情況，其中凸台基座與主壁相接。螺釘凸台還引起額外的複雜性，因為凸台中的插入件需要結構要求的壁厚。在似乎需要更大（比標稱值）的壁厚的地方-希望通過在工具中添加額外的功能來挖出較大的區域，這將導致更均勻的壁厚，始終從三個方面考慮零件。通常設計是用於完成目標的一系列 2D 截面，但是塑料零件的輪廓可能會導致彎曲區域，從而導致壁厚不均勻的區域。
- 2.出於所有原因，半徑所有過渡區域。這些圓角部分使熔體流動更容易。同樣，尖銳的角只能通過本身會很尖銳的模具製造。這些鋒利的邊緣很難在工具的使用壽命內保持。內圓角區域應匹配外圓角區域，即內圓角+標稱壁厚=外圓半徑（部分）。內半徑與壁厚的比率（ R/T ）應盡可能高，以減小橫截面中的應力，建議 $R/T > 0.75$ 。塑料零件圖上的一些註釋包括諸如半徑所有角 0.030 半徑或指定半徑之類的說明；但是必須注意任何要覆蓋圖紙上所有情況的註釋。
- 3.工具製造商/成型機的選擇是至關重要的，以與部件的整體滿意度。其他因素（成本除外）也進入了此選擇，例如：

- 工具質量-工具的材料選擇和熱處理。
- 工具的交付時間表-首件和生產數量零件。
- 溝通路徑的開放性-供應商與零件設計師的溝通水平，關於零件設計的建議溝通以及可能出現的任何持續性問題。定期計劃的里程碑發布至關重要。面對面的討論可以幫助交流，但也可以有效地使用 Internet。
- 零件的總成本-包括交貨（模製/裝箱/裝運），零件所需的任何固定裝置，二次加工和質量控制。
- 從當前批准的供應商中選擇供應商-必須考慮合格新供應商的成本。同樣，當前批准的供應商存在的問題也是已知的，而未

批准的供應商可能意味著未知的問題。 4.設法減少零件所需的二次加工量。查看工具幻燈片所涉及的權衡。通過向工具 添加滑塊（或工具中的旋轉刀片）可以產生零件的特徵，這是減少第二次操作的一種方法。然而，這些滑動件或旋轉插件使工具更昂貴並且使模製操作複雜化。例如，如果零件中需要大螺紋，則可以通過包括工具的旋轉部分（鬆開以從工具 中移除零件）在工具內形成這些螺紋，從而消除了（次要）穿線操作（在工具外 部完成）。但是，將螺紋攻絲作為次要操作可能比將螺紋包括在更複雜的工具（具 有運動零件）中要便宜。零件中的某些孔可以通過所謂的交叉截止在工具中形成。這種交叉關閉會刺穿側壁，且側壁上的零件成一定角度。但是，交叉切斷的缺點 是工具中的階梯式分型線使工具稍微複雜化。同樣，與工具供應商/模具的討論 對於決定權衡選擇非常寶貴。 5. 吸水應盡可能豐滿，而不影響均勻的壁厚或設計。在某些區域，零吸水是可 能的（例如，紋理化實際上會產生底切，如果吸水深度允許零件彈開，則不需要 側拉。）所需的吸水量取決於以下功能： •材料 •收縮 •零件設計需求 •粗糙度 肋骨上的最小牽伸允許較高的肋骨，同時在肋骨與壁匯合處保持相對均勻的 壁厚。 6.放寬設計中的加強筋數量。這是使用模製塑料零件的優點之一，因為可以增加 零件加強肋，而成本卻很少。這些肋增加了剛度並控制了熔體流動。應探索肋的 圖案，例如圓形和矩形。相互連接的肋或側壁可增加零件的整體剛度。 7.注意零件上焊接線 的確切位置。當材料在零件內流動並在塑料最初進入零件 的相對兩側（在工具澆口處）相遇（本身）時，就會出現熔接線。這些焊接線會 導致零件的結構薄弱區域（因為材料在兩個焊接路徑的接合處已冷卻）。同樣， 焊接線在零件的外部顯示為實際的線，從而導致必須解決的美學問題。 8.考慮零件設計中的區域，這些區域將導致產生的工具本身非常薄的部分（甚至 是彎曲的芯銷）。這些薄的工具部分可能難以維護，並且可能導致破裂而延遲零 件成型。始終在模具上添加部分，以便於移除。這些部分（工具插件）可用於以 下任一方面： •易於維護 •容易產生另一個零件變化，例如，有孔的零件和無孔的零件 例如將零件修訂級別放在工具插件上是很常見的，這樣隨著修訂級別的變化， 僅需要修改（小）插件。 9.考慮在設計中添加特徵，這將有助於對齊（或在結構上幫助）配合零件。例如在可以與具有圓形正極銷的零件配合的零件中添加圓形凹槽可以幫助這兩個零件配對的整體設計。 10.考慮脫模針的位置以及多少。零件已經（大約）凝固後，脫模針將有助於將 零件從模具中彈出，但是它們通常會在零件的（希望）非修飾性的一面留下痕跡。設計人員應檢查這些位置，以確保它們放置在最佳位置。例如，不應將脫模針放 置在設計中要放置墊圈的位置（因為墊圈表面將不平坦）。 11.搜尋文獻並查看其他塑料零件以獲取知識。多年來，在以下領域獲得了許多 知識： •按扣設計 •塑料零件的緊固過程（組裝方法）和緊固件 •新材料混合 •模內修飾 在一般的塑料設計過程包括以下六個步驟：正確修訂 CON 組特倫的文檔這裡假 設。設計評審從廣義上講應包括應該對單個部分和整個項目進行評審的所有人 員（應包括內部評審員，承包商和供應商）： 1.零

件設計，設計經過審查。 2. 放置工具投標，已發送 CAD 文件（視情況而定）。工具供應商和樹脂製造商會 審查設計，對設計的任何更改將再次進行審查、同意開發工具的時間表和第一篇 文章、同意第一條驗收計劃、同意所有已知零件的價格（包括所需的夾具）。 3. 最終設計獲得批准；工具採購訂單已下達特定訂單（並且同意）修訂級別。 4. 工具製造商輸入 CAD 文件並添加正確的收縮係數（零件將收縮以確保正確的零件 幾何形狀）。 5. 定期安排會議以審查項目里程碑，更新將提供給項目管理。零件和/或時間表 的任何更改都清楚地廣播。 6. 撰寫並審閱第一篇文章，考慮的修改包括對項目進度的影響，按計劃安排零件 的試生產。

4.7 鑄造金屬 鑄造金屬與上一章關於塑料成型的部分有很多共同之處，但是有一些明顯的區別。首先，如上一節所述，實際上有很多塑料成型工藝、鑄造工藝也可以說相同。有很多鑄造技術。鑄造技術通常因以下因素而異：

- 金屬鑄件
- 正常鑄造零件的尺寸範圍
- 公差應按工序確定
- 工具成本
- 單價
- 表面光潔度期望
- 建議的最低吸水深度
- 正常最小截面厚度
- 訂購數量
- 正常的交貨時間

鑄造技術的共同描述如下：

- **壓鑄**：將熔融金屬在壓力下注入通常經過水冷的硬化鋼模具中。模具打開，鑄件彈出。心模
- **永久鑄模**：將熔融金屬重力倒入鑄鐵鑄模中，並用陶瓷洗模液塗覆。心模可以是金屬、沙子、沙膜或其他。模具打開，鑄件彈出。新的 LPPM 方法壓力可高達 15 psi。
- **蠟鑄模**：金屬模具製造蠟或塑料複製品，將它們澆注，然後用包埋材料包圍、烘烤、然後將金屬倒入最終的型腔中，模具破裂以去除鑄件。
- **石膏模具**：將石膏漿倒入半模上並使其凝固；然後從模型中取出模具，進行烘烤和組裝，然後將金屬倒入最終的型腔中，模具破裂以去除鑄件。
- **陶瓷模具**：將陶瓷漿料倒在上模和下模上，使其凝固，然後從上模中取出模具，然後烘烤（在 1800°F 下），從而生產出堅固，穩定的模具。組裝有或沒有芯的 模具，並將金屬倒入最終型腔中，模具破裂以去除鑄件。
- **石墨模具**：類似於陶瓷模具，但使用石墨模具代替。芯銷通常是鋼。
- **樹脂殼模具**：將樹脂塗層的砂子倒在熱金屬圖案上，固化成殼狀的半模。將它們從花樣中移除，組裝有芯或無芯。將金屬倒入所得腔中，模具破裂以去除鑄件。
- **砂型鑄造**：將調質好的沙子包裝到木材或金屬半模上，從型模上取下，組裝或不組裝芯子，然後將金屬倒入最終的型腔中。可以使用各種芯材，模具破損去除 鑄件。現在正在使用的專用粘合劑可以改善公差和表面光潔度。

表 4.2 鑄造技術表

- **金屬注射成型**：將極細的金屬粉末與粘合劑材料結合在一起注入模具。零件被彈出，粘合劑熔化或溶解，然後真空燒結，理論密度為 94–99%。
- **金屬粉末**：金屬粉末在上下沖頭之間的模具桶中壓縮。下沖頭彈出零件，如果 需要緊密公差，則將其燒結並定尺寸。

表 4.2 總結了上述各種鑄造技術的區別。鑄造零件的設計通常具有與注射成型零件相似的約束條件，即在所有拐角處都需要恆定的壁厚和半徑，但是存在一些重要的區別。由於大多數鑄造材料較脆，它們更容易在尖角處產生應力，因此需要更大的半徑。注射成型產生的下沉不是 鑄件的大問題。但是，仍然需要對零件進行去心模以保持恆定的壁厚（並減輕重量）。鑄

造過程雖然類似於注塑成型，但會導致必須解決的獨特問題：**A.** 氣孔鑄件不是均勻的，鑄件的表皮（外層，可能為 **0.020** 英寸厚）相對光滑 且連續。這是因為與金屬的熔融流動相比，模具表面本身相對較冷，並且在 該材料的外邊緣上形成了緻密的表皮。在該表皮的正下方可以是相對多孔的 金屬中捕獲的空氣（氣體）區域。如果用機器在外表面上進行切割，則可能 會暴露出孔隙（金屬不均勻）區域。有時會在鑄件的外部進行機械切割，因 為任何特定尺寸的公差都可能很高。例如，可以將名義上設計為 **4.000** 英寸 的外部尺寸鑄造成 ± 0.010 英寸。因此，如果鑄件最終達到 **4.010** 英寸， 而設計需要 **4.000** 英寸，則可能需要 **0.010** 英寸才能將鑄件加工掉。零件加 工成 **0.010** 可能會剝奪堅硬的皮膚，從而露出潛在的孔隙。 同樣，如果設計需要較低的表面粗糙度（例如用於壓力密封的表面），則鑄件 表面可能不夠光滑。如果鑄件表面粗糙度為 **500 μ** 英寸，並且需要 **32 μ** 英寸的 表面（例如）來提供密封表面（帶有 **O** 形圈），則所討論的表面將需要進行機加 工。 有時使用浸漬來提高壓鑄件的壓力密封性和光滑的表面。當指定浸漬時，目前 使用厭氧和甲基丙烯酸酯的體系。這些系統生產的密封鑄件可用於壓力測試。 鑄件中的孔隙率也會造成嚴重的質量控制問題。由於孔隙率可能是鑄造過程的 結果（正確設置溫度和壓力以及原料的稠度），因此即使批次中的某些部分沒有 孔隙率，也可能在某個位置某個部分出現孔隙率。如果零件中出現孔隙，則在載 荷作用下的臨界面處，零件可能會失效。因此，必須篩選出孔隙率，並且必須 控制和監視該過程。如果零件是涉及安全或國防需求的關鍵零件，則該零件將需 要採用某種方法來確保零件強度。

B. 所需的二次操作鑄造過程通常需要在鑄造過程之後進行一些大型操作，以使其 準備好進行最終組裝。這些操作可以分為機加工塗層和修飾/防腐塗層。 與注射零件相似，必須去除材料進入零件（在澆口處）的區域。即需要進 行機械加工以從注射澆口去除殘留在零件上的材料的痕跡。該機 加工操作可以像 手工剪鉗一樣簡單，以去除殘留物，但是如果該殘留物在整修 上可見的表面上， 則可能更加複雜。與注射成型零件不同，鑄造工藝通常還涉 及修整模具，以去除 模具分型線上的材料，這些材料要以飛邊的形式脫落，要 有意被允許用固體金屬 填充整個零件，這種修整模可以由壓力機加治具組成， 以控制修整過程，或者是 無控制的（例如手動完成的砂輪）。由於上模和下模 之間的微小不匹配而發生閃 光。在上模具和下模具接合的地方，鑄造過程的壓力迫使少量（**0.001-0.005** 英 寸）的材料噴出，並且隨著模具的使用越來越 多，這種情況變得更糟。修剪模具（和固定裝置）要避免手動修剪可能要花費 數千美元。因此，這是要根據任何工 具支出做出的另一項成本/時間決定。 可以將各種表面處理系統應用於壓鑄件，以提供修飾效果，腐蝕防護或增加的 硬度和耐磨性。建議根據供應商和參考資料尋求有關表面處理的具體信息，因為 這些信息因鑄造材料和表面處理目的而異。例如，對於鑄鋁：

- 可以通過油漆、拋光/環氧樹脂，電鍍和粉末塗料實現修飾效果。
- 可以通過油漆、陽極氧化、鉻酸鹽和礬石來達到環境防腐的目的
- 可以通過浸漬來填充和密封表面/亞

表面。 •硬質陽極氧化可提高耐磨性。 沒有鑄件設計者應該沒有 Ref 的參考材料。NADCA 壓鑄件產品規範標準是聖經， 顯示了所需的背景信息，包括： •工藝和材料選擇 •壓鑄模具 •合金數據 •工程和設計（特定於壓鑄件） •質量保證 •商業慣例

4.8 尺寸/公差

4.8.1 公稱尺寸的選擇

這可能是本書中不尋常的部分，但我相信它將在設計出色零件的過程中極大地幫助您。我想從一些基礎知識開始，例如我們為什麼選擇公差以及如何導致設計。設計人員最終如何確定零件尺寸會導致多年的無故障組裝和非常滿意的客戶。如果操作不正確，則零件將處於不適合和超出公差的相當恆定的狀態，並且將發生裝配線停工。從某種意義上說，本書的這一部分是 Chap 的前身。關於組裝和可維修性，適當尺寸和公差的零件將導致這些零件的製造裝配非常順暢。關於英制的單位制與公制的單位制的一些評論也是適當的（請參閱單獨的討論）。我甚至要開始討論如何實際設計零件（實際上是用於執行零件機加工或焊接的工裝夾具和夾具）。這是在 CNC 零件，計算機和 CAD 成為標準工具的一部分之前。我們實際上在設計零件時會考慮到公差。也就是說，我們嘗試使用標尺的通用標記來設計零件。刻度通常在每 $1/32$ 英寸上被劃分為多個標記，即每 0.03125 英寸上有一個標記，還會有標記指出 $1/16$ 英寸（ 0.0625 英寸）、 $1/8$ 英寸（ 0.125 英寸）、 $1/4$ 英寸（ 0.25 英寸）和 $1/2$ 英寸（ 0.50 英寸）間距。因此，我們的設計可以爭取公差，例如： • 3.00 • 3.50 • 3.625 （ 3.62 ） • 3.6875 （ 3.68 ） • 3.71875 （ 3.72 ） 請注意，這些公差在以較小的分數增加（ $1/2$ 、 $1/8$ 、 $1/16$ 和 $1/32$ ）的意義上變得更不平衡。另請注意，將公差舍入為偶數。為什麼選擇偶數？如果將整個零件選擇為 3.68 英寸，那麼如果要在零件的一半位置放置一個孔，則該孔應放置在 1.84 英寸處。如果將整個零件選擇為 3.69 英寸，則一半的孔將為 1.845 英寸，但是該 3 位尺寸暗示了比實際所需的更緊密的公差。還要注意，帶有公差標記的刻度尺實際上在另一側具有刻度，刻度的增量為 0.020 英寸。因此，零件的設計本可以以十分之一的增量進行設計，例如 3.120 英寸，但同樣，分數更常見。這引起了關於名義或均等性的討論。設計人員更傾向於選擇偶數，並且鑑於此，可以選擇： • 3.00 • 3.10 • 3.25 • 3.26 • 3.27 設計師會按上面的順序（從上到下）選擇它們，而不考慮大小，僅考慮數字。可以選擇 3.25 代替 3.26 ，因為 3.25 是 $3\frac{1}{4}$ 。 3.26 確實具有一個優勢，因為它是偶數（很容易一分為二）。 3.27 麻煩是因為它不是一個普通的分數，也不是一個奇數，上面的討論假定一個數字要在小數點後兩位。

4.8.2 美國工程單位與國際單位制

對尺寸/公差的評論在單位制（英寸或毫米）中都非常有用。在美國，可能開始設計時以 3.000 英寸為標稱尺寸或起點。在歐洲，相同的起點可能是 75 毫米（等於 2.953 英寸）。如果設計在美國以 3000 英寸開始，那麼如果要在歐洲製造產品，則將這些圖紙精確地轉換為 $3 \times 25.4 = 76.2$ 毫米。試圖在轉換係數（英寸到毫米）和設計師出身的思維方式之間進行區分。因此，如果是一名美國設計師（接受過美國教育），當時正在為一家歐洲公司設計零件，那麼可能會創建一個以毫

米標稱尺寸開始的 設計，因此將從 75 毫米開始（而不是選擇 3.000 英寸）。在一般數字範圍內的 選擇包括： •70 毫米 •75 毫米 •80 毫米

4.8.3 數控機床前後的世界工具類

在將計算機添加到計算機之前，使用機床，機械師會用手在錶盤上調整讀數，然後進行切割。例如，在車床上，如果將直徑為 2.000 英寸的桿（標稱值為 2.000，公差為 ± 0.002 英寸）作為最終直徑，則將在桿上進行初始切割；對零件進行的物理測量可能是例如直徑 2.015 英寸（總是要進行初步切割，以使零件稍大一些）。然後將車床上的刀具在零件直徑上歸零，然後將刻度盤移至 0.0075，在零件上切深 0.0075 英寸，理論上將使該零件減小至 2.000 英寸。如果要對該零件進行其他測量，則可能會測量到接近 2.000 英寸的直徑。當然，添加滾花、電鍍或噴漆的複雜性是另一個要考慮的因素，但讓我們暫時保持簡單，不考慮其他精加工工序。從車床中取出零件後，將對其進行檢查。如果零件在 1.998 英寸和 2.002 英寸之間，則將其通過為正確且符合規格的零件。進行調零、調整、切割和檢查的通用程序，以生產方式為獲得零件（公差為 ± 0.002 英寸）制定了行業可接受的標準。也就是說，機器、機械師和檢查過程以合理的方式提供了零件。如果使公差更小，例如 ± 0.001 英寸，則由於機器，機械師或檢查過程更加困難，零件將更昂貴，從而導致生產可接受零件的時間變慢。同樣，要求公差更寬鬆的零件（例如 ± 0.003 英寸）並不一定會導致零件成本降低，因為 ± 0.002 英寸將是標準做法。當然，隨著廢品率的下降，機加工車間將享有更寬鬆的公差，但是這些節省可能不會傳遞給客戶。再次，在這裡提出一個論點，即指定與您的供應商合作的公差，以在零件需要和可以合理地（或通常）生產的零件之間找到平衡，在正常條件下進行車削加工將產生 7-13 級的加工性能，對於 2.000 英寸的直徑， ± 0.002 英寸的公差是合理的（但是很困難），正常一致精度將為 ± 0.005 英寸。現在，借助 CNC 控制的機床，零件成本得以降低。這是由於以下幾個原因：

- 1.減少生產零件的總時間。一旦對機器編程，機器將按照該程序運行，從而基本上消除了機械加工。因此，不需要調整移動。（當然，從一般意義上來說，仍然需要機械師監督操作。）
- 2.由於機器消除了操作員錯誤，因此所需檢查較少。當然仍然需要檢查。
- 3.機台可以以機床控制的方式更換刀具、速度/進給，加工軸以及幾乎任何加工操作。這比人工操作要快。
- 4.零件設計的微小更改非常容易實現—對程序進行快速修訂，然後快速生產新的修訂零件。即使進行了廣泛的更改，也僅意味著相對簡單的程序更新。
- 5.可以將加工因素內置到程序中，以適應可能出現的任何加工情況。例如，如果打孔導致孔的 xy 坐標超出公差範圍，則可以調整程序以使該孔位置達到公差範圍。

通過 CNC 控制的機台對金屬進行沖壓，可以使 xy 工作台移動並通過頭部旋轉來更換工具。與上一代機床相比，這可以減少設置時間，消除夾具，並節省大量時間。由於計算機程序輸入到 CNC 控制的機器中，零件僅是數字數據的結果，該公差數據被傳送到那些加工程序。這可以將設計意圖極其快速（且無錯誤）轉移到成品。

4.8.4 總體尺寸和設計

為了繼續進行尺寸標註及其與設

計的一般性主題，通常會遇到一些約束。這些示例的一般假設為：設計中需要最小尺寸和重量、成本（Chpt4）。一個物體與另一個物體之間的最小間隙為 0.010 英寸。顯然，這在實際設計中會有所不同，並且取決於要使用外殼的對象和環境。外殼的標稱厚度為 0.050（將討論厚度公差），但目前厚度僅為 0.050。狀態的最先進的設計可能需要一切從定制片金屬計為夾具固定的解決方案，包括去/不通過計基本上允許部件與構成沒有（或非常少）的公差。這些示例將不考慮這些類型的情況，而是考慮更正常的設計情況。同樣，在無限制的時間和金錢的情況下，這些示例幾乎可以採取任何例外措施。設計通常以以下兩種思維方式之一進行：見圖 4.2.。按規格確定的設計：工件必須小於 3.5 英寸。這是因為先前的產品為 4.0 英寸。在這種情況下，我們從 3.5 英寸的整體外殼尺寸開始，如果要將一個 3.0 英寸長的單個組件放入我們的外殼中，我們立即知道牆的內部與該組件之間的標稱距離為：3.5 減去 3.0 減去（0.050 的 2 倍）除以 2，等於 0.2 英寸。我們已經接受了 3.5 英寸的外部尺寸，並且正在接受壁和部件之間的 0.2 英寸的間隙。圖 4.2. 整體尺寸和設計考慮合力的設計：一個單一組件即是 3.0 英寸長被放成一個外殼。該襯套的最小尺寸的所述外殼在 $3.0 + \text{clear-ANCE 每一側}(0.010, \text{估計現在}) + \text{所述外殼的兩個壁的厚度（在剛剛“x”方向）}$ ；因此，機台的整體尺寸為： $3.0 + 0.010 + 0.010 + 0.050 + 0.050 = 3.120$ 英寸 但是並沒有規定的公差 ± 0.010 的 3.0 英寸的組成部分。假設此組件的最大尺寸實際上是 3.03 英寸。這樣機台外部的最小尺寸為 $3.12 + 0.03 = 3.15$ 英寸。實際上，外殼的厚度會有公差。investigate 對於各種材料：鈹金厚度：鈹金通常在具有厚度公差標準的標準量規中使用。16 號鋁板的厚度為近似 0.050 英寸，每個厚度（5050 鋁，庫存寬度 100 英寸）具有 ± 0.007 英寸的公差。根據我的經驗，厚度將進入公差的較薄的一面（但可能會進入較厚的一面）。一般對板進行去毛邊（在沖孔之前）將使厚度減少 0.001-0.002 英寸，而某些電鍍將使厚度增加 0.001-0.002 英寸。除非實際需要考慮到特定的厚度公差，否則設計人員應該對標稱厚度進行計劃（對於大多數設計）。請注意，應在最大和最小條件下檢查間隙，以確保在裝配和客戶使用時均能正確安裝。因此，設計通常以按目標確定或給定結果類型的設計進行。尺寸確定的設計可能會節省一些時間，但是紀梵思設計的結果通常是達到最小尺寸設計的更好方法。

4.8.5 寬容理論：需要 由於零件無法完美生產，因此需要零件尺寸公差。製造技術不能生產出完美的零件，這可能是顯而易見的，實際的公差量基於幾個（可能是相互競爭的）因素：

1. 成本（較大的公差製造成本較低）。
2. 相同的部分（相同的部分）需要被更換的-到的所有零件的公差必須工作。
3. 零件是隊友與其他部分必須做的是與所有部件在該極端的他們的公差。

因此，指定公差的默認步驟是：

1. 選擇的公差為的合理的或最常見的製造工藝。例如，零件是直徑 0.25 英寸、2.00 英寸長的零件，則生產該零件的常見方法是使用 CNC 控制的主軸機床（或車床）。直徑的行業認可公差可能為 ± 0.002 英寸。如果零件是熔模鑄造，則直徑公差可能為

+或-0.001 英寸。 2.如果在上面是可以接受的，以該設計、外觀以增加的公差甚至更多，檢查 回來到可接受的的整體設計。增加的公差將允許更多的部件通過檢查，這應 該（可能）導致總體成本的降低。 3.收緊公差，即使最常見的製造工藝在設計要求更嚴格的公差的情況下也不會產生該公差。 請與零件製造商聯繫，以確保（合理地）可以達到更嚴格的公差， 或者以何種成本實現。每個尺寸（位置，孔的大小，角度等）都必須具有公差，該公差可以在 圖紙上明確說明，也可以作為圖紙上整體符號的一部分。 一些設計要求零件的公差非常低。 也就是說，如果製造的零件超過了這些公差，它們將無法工作！ 大多數設計應允許標準行業公差具有成本效益。 這些標準行業容限可通過以下方式找到： •諮詢零件製造商 •研究各種行業可用的標準 •使用設計師先前獲得的知識優勢（即經驗） 公差以幾種方式在圖紙（文檔）上列出。 圖紙上的單個尺寸可以帶有其 自己的公差。 可能有一些註釋定義了多個尺寸上的公差，或者在圖形上有一個註釋涵蓋了每個尺寸。 無論如何，每個尺寸的確確實有公差（應指定）。 有幾種尺寸標註方法。例如，名義上的尺寸為 2.000，公差為 ± 0.005 ， 可以在圖形上指定為： •2.000 ± 0.005 •2.005 / 1.995 •2.005 + 0.000 – 0.010（單邊尺寸） •1.995 + 0.010 – 0.000（單邊尺寸） 如果該公差是一個奇數號（比如，0.003），這將產生一個應試 PLE 的 雙邊尺寸，如 •2.000 + 0.002 – 0.001 但是，這將是相當罕見的情況。 當在製造過程中移除材料時達到臨界尺寸時（例如在緊密配合的孔和軸 的情況下），單邊尺寸是有利的。因此，對於軸（去除了材料的軸），限 制的上限首先顯示為： •2.005 + 0.000 – 0.010 但是，將這個維度列為 •2.000 ± 0.005 公差的小數位應與基本尺寸顯示的小數位匹配。例如，給定的尺寸為 2.000 的公差將列為 ± 0.010 （不是 ± 0.01 ）。 4.8.6 理論公差：累積公差 每個單獨的零件的整體尺寸（長度/寬度/厚度）必須最小。此外，零件通常還具 有需要確定尺寸的特徵（切口，孔等）。在確定尺寸時，考慮一個公差對另一個 公差的影響非常重要。 當表面在給定方向上的位置受到多個公差係數的影響時， 公差將累積。 例如，在圖 4.3 中，可以從表面 B 或表面 L 控制表面 A 的位置： 在累積公差中，曲面 A 相對於曲面 L 的位置的公差為 2.000 + 0.000 – 0.010。 在基準線標註中，曲面 A 相對於曲面 L 的位置公差為 2.000 + 0.000 – 0.005。 因此，如果需要將特徵（表面 A）保持得更靠近表面 L，則應根據該特徵直接確定該特徵的尺寸。 圖 4.3 公差累積 應分析每個尺寸，以準確確定應從哪個尺寸（尺寸）進行控制，以免公差從 不相關的功能中累積。 4.8.7 檢驗尺寸（關鍵尺寸） 零件可以具有數百個尺寸。要完全指定某些零件上的每個功能需要花費 大量時間。從歷史上看，對圖紙上的每個特徵都進行了尺寸標註，以便可 以根據規範（圖紙）或不符合規範進行檢查和發現。隨著用於設計和創建 工程圖文檔的 3D CAD 系統的出現，完全有可能以數字方式傳輸所有零件信 息，而無需在工程圖上實際指定任何尺寸，並使零件以標稱指定尺寸製造。 也就是說，相隔 3.000 英寸的特徵被繪製為相距 3.000 英寸，並且該數字 是零件製造商獲取的

文件的組成部分。在其 CAD 系統上調出該零件文件的 任何人都可以查詢該文件，並看到這些特徵需要相距 3.000 英寸（在 CAD 文件中具有規定的公差）。實際上，檢查部門如果可以訪問 CAD 文件，則 可以檢查零件（也許使用 3D 計算機控制的檢查系統），並且確定該尺寸（3.000）是否在公差範圍內。因此，問題就變成了誰真正需要知道尺寸以及在圖紙文檔中顯示尺寸的 目的是什麼？對於每個組織，該問題的答案可能會有所不同。一些組織已 經決定不指定每個維度，而是指定維度的子集。在零件上標註尺寸來確定零件是否已通過檢查的尺寸已成為慣例。在只有（相對）幾個尺寸的零件上，這可能意味著所有尺寸都被認為是關鍵的。在具有數百個尺寸的零件上，這些尺寸的子集可能被認為是關鍵的，必須 通過標準檢查程序進行驗證。這些程序可以是 100 %檢查，也可以是某些 商定的小於 100%檢查的採樣過程。哪些尺寸將被視為關鍵尺寸並因此進行了檢查？用於指定（所有維度的）此子集的選擇為：

- 1.功能對零件功能是否至關重要？如果某個特徵（孔，切口等）與另一個零件配合，則可以將其視為關鍵尺寸。如果以某種方式涉及安全性，則必須檢查尺寸是否屬於關鍵類別。
- 2.特徵是否具有特殊（非標準）公差，該公差將該尺寸歸為關鍵類別？如 果是這樣，則可以將該維度視為關鍵維度。
- 3.某些尺寸（當零件已製成原型時）是否存在問題，是否會引起零件製造商某些 問題，從而導致零件發展？如果是這樣，則該維度是另一個被標記為關鍵維度 的選擇。這種臨界尺寸概念會引起一些問題，因為任何特徵（無論多麼微不足道，例如 內半徑），如果不是公差，都會引起問題。只是許多維度沒有引起任何問題的 可能性很高，因此只有一小部分被視為關鍵。

4.8.8 真實位置標註 真實位置標註，或更確切地說是幾何標註和公差換算，是一種針對零件特徵的實 際功能和關係指定工程設計和工程圖要求的方法。此外，這是一種技術，當正確應用時，可確保最經濟和有效地生產這些特徵。該系統的主要目標是在設計，生產和檢查組之間進行統一解釋。我將不在這裡介紹細節，而是簡要概述幾何 尺寸和公差（GD&T）的基礎和推理。GD&T 的基本原則之一是將想法從矩形公差帶更改為圓形公差帶。直角坐標 系中的正常位置公差允許正方形公差帶，而公差帶變為具有真實定位的圓（圓的 面積比方形大 57%）。製造業之所以轉向幾何公差，主要是因為它提高了生產率並降低了成本。優點包括： - 通過指定最大但可行的公差來提高生產率，在許多情況下，允許製造偏差超出 尺寸公差（較舊的公差體系）規定的公差 - 通過明確說明與零件功能有關的設計要求，使配對零件具有互換性，並可以使 用省時的功能規 - 圖紙及其解釋的統一性，確保工程，製造和質量控制之間的有效溝通 如果從零件邊緣定位了四個孔的圖案，並且在孔之間指定了一個距離（包括四 個尺寸的公差），則將增加無法配對的零件配合的機會。相反，如果四個孔的 圖案位於零件邊緣，並且孔之間的 X 和 Y 使用基本（精確，理論，無公差）尺寸，並且添加了真實位置尺寸，則不會 關於模式的潛在位置的模稜兩可。如果將尺寸公差為 ± 0.005 英寸公差的單孔位置替換為直徑為 0.014 英寸的 位置公差

帶，則公差“面積”將從矩形（ 0.010×0.010 ）區域擴大到圓形 $\pi/4$ （ 0.014 ）² 面積，導致面積增加 57%。這可以等同於實際拒絕率從每 100 個零件中的四個零件減少到每 100 個零件中的兩個零件。因此，僅從尺寸公差變為位置公差，就會有更多可接受的零件。的真實位置標註包括：

- 1.基本定位尺寸（不適用公差的情況）
- 2.添加到要定位的要素中的表達式（符號），例如位於 .XXX DIA 內的真實位置（或位於真實位置的 .XXX R 內）
- 3.基準參考為防止誤解，應始終相對於基準確定真實位置。

實際上，圓形公差帶等於位置公差，特徵（通常是孔）的軸必須在圓柱體內。孔的中心線可以與圓柱公差帶的中心線重合，也可以與其平行，但可以移位以保留在公差圓柱體內，或者可以保持在公差圓柱體內而傾斜。因此，孔的軸線不僅以 2D 定義，而且以 3D 定義，這是對孔圖案的可接受性的更為有力的描述。這在圖 4.4 中示出。通過 GD&T 指示幾何公差的方法定義了直線度、平面度、平行度、垂直度、角度、對稱性、同心度和圓度的條件。例如，附在圓柱上的註釋表示直線在 0.010 以內是該語句的簡寫：無論特徵的實際大小如何，表面的任何縱向元素都必須位於兩條平行線（相距 0.010）之間，其中兩條線和特徵的標稱軸共享同一平面。因此，標準化註釋傳達了非常清晰的含義，這是設計者、製造者和檢驗部門普遍理解的。基準特徵是 GD&T 中的強大工具。應該根據其能力來選擇它們：

- 功能性。
- 配合面。
- 易於訪問。
- 可重複。

有關基準的其他一些事實：

- 基準是理論上精確的幾何參考。
- 主基準提供特徵方向。
- 假定零件本身存在基準。
- 從工具點或曲面建立基準。
- 平板和 V 形塊是模擬基準。
- 基準特徵（這是與模擬基準表面配合的零件的實際特徵）包含不準確性。
- 基準參考框架由三個相互垂直的平面組成。

圖 4.4 位置公差控制垂直度 GD&T 還具有修飾符的概念。修飾符與特徵控制符號一起使用，以識別尺寸公差如何影響幾何公差區域。最常用的修改器是最大材料條件（MMC）或與特徵尺寸（RFS）無關。MMC 在圖形上顯示為圓圈 M，而 RFS 在圖形上顯示為圓圈 S。MMC 表示物體中可能的最大材料，並用於特徵控制符號中。這意味著幾何公差僅會影響 MMC 處零件的尺寸。（真實位置符號帶有十字線的圓圈表 MMC）。RFS 意味著幾何公差將影響任何物體的任何產生的尺寸。大多數幾何特徵（直線度、平面度等）都暗示著 RFS。讓我們看看修改器的使用如何影響幾何公差帶。我們來看三個例子：

- 常規（非 GD&T）
- MMC
- RFS

尺寸為 0.25 ± 0.02 的條將全部在 0.27 到 0.23 的可接受尺寸範圍內生產。在常規公差下，無法控制直線度。使用 GD&T，直線度符號和 MMC（或 RFS）時，最大不直線度隨著生產尺寸的變化而變化：同樣，幾何公差是一種強大的技術，可幫助設計人員考慮零件設計的控制特徵以及如何實際檢查零件以確定零件是否與圖紙一致（設計），列出了其他參考。

4.9 現成的組件

電子外殼的設計者必須始終從搜索已經可以在新設計中使用的設計開始，搜索內容應包括公司外部的內部資源（在設計師自己的公司內部）或 OEM。設計人員已經可以使用的示例是：

- 緊固件、墊圈、支座、螺紋嵌件、銷、彈簧
- 散熱

器、絕緣子 •櫥櫃、架子、滑梯 •橡膠墊圈、保險槓、減震器、墊片、O 形圈 •LED、顯示產品、開關、按鈕 •電纜、連接器 •標籤、名牌 有時，現成的部分並不是所需要的。 決定是製造新零件（正是所需的零件），與 OEM 聯繫以查看是否可以實現稍有不同的版本，或者使設計適應現有零件需要 進行分析的決定。 該決定應集中在成本，時間和對規格的符合性的常規約束上。 同樣，OEM 供應商的目錄通常包含相關的設計信息，可用於設計與目錄中相似的零件。 應考慮重複使用另一種設計的零件。 例如，如果需要新的更薄的外殼，是否 可以重複使用本外殼的上部？

4.10 原型製作

我試圖寫這本書，以使它與及時發展的設計師相關，也就是說，不要在文本中加入技術資料，而這些資料很快就會過時。 本節中的原型製作處於風險中，因為 我目睹了用於原型製作的技術在我 30 多年的設計工程中經歷了最大的變化，我 可以看到它們繼續以迅速的速度變化， 使我現在所說的關於特定過程的很多東西都過時了（也許在發布之前）。 但是，不會過時的一件事就是需要原型。 原型設計對於任何工程產品的高效設計都是至關重要的。 快速生產，相對現實地表達最終想法，使團隊中的每個人都知道項目的發展方向。 原型將推動項目前進或重新評估當前的想法。 原型可以是整個項目的任何部分， 從產品的一小部分到整個成品。 我已經看到許多（非常）原始原型的實例，這些異常實例可以為設計團隊提供 驚人的快速信息。 紙、紙板和剪刀可以快速說明設計的某些方面-同樣，原型 生產的速度也不能過分強調。 圖紙本身並不能使設計團隊中的每個人都對設計的未來感有所了解。即使是三 維表示也無法完全傳達設計。有些設計工程師只看圖紙就能看到最終的設計將達到目標。但是，有些人沒有能力將這些線條和數字解釋為他們可以想像的東西， 並且他們需要觸摸並感覺到一個物體來確定它是否有效。尺寸是一個方面。通過 物理原型似乎比在圖紙上更容易傳達。當然，任何具有人為交互作用的設計功能 都需要由設計團隊實際使用，以了解設計功能實現設計目標的能力。客戶的手幾乎要觸摸的所有東西都需要建模，以了解心手互動將如何工作。符合人體工程學 的整個學科致力於確定最佳決策。例如，如果要在產品上開門，則會發生一些常見問題（原型將幫助回答這些問題）：

- 哪種機制可以打開門（並關閉門）？
- 門一旦損壞（在異常使用情況下）如何維修？
- 門會左右打開還是上下打開？
- 門需要密封到什麼程度（一旦關閉）？
- 打開（關閉）門需要多少力？
- 門是否需要保持打開狀態（不保持打開狀態）？
- 門是否需要上鎖？
- 門是否滑動，鉸鏈，滾動或以其他方式移動以打開？
- 什麼（在門上）用來打開和關閉門？

速度是生產原型的關鍵因素。 原型旨在提供有關設計本身的快速信息，因此 找出是否遵循設計方向或是否改變方向是該過程的重中之重。 另外，必須確定 原型將如何很好地體現設計意圖。 原型是如此原始，以至於僅僅因為它不能準確地模仿最終設計而允許繼續設計方向，將無助於整個過程。 在原型過程中確 定準確性與時效性之間必須取得平衡。 一旦確定速度為關鍵因素，那麼成本必須是次要的。 也就是說，節省總體產品交付參數（時間和符合規格）的昂貴原 型

生產是一項可靠的投資。內部原型開發能力與將原型外包出去始終是（項目管理團隊）需要回答的問題。一些公司具有內部原型製作功能，因為它具有以下優點：

- 更好地控制原型的計劃（針對競爭需求）（應導致更快地生產原型）。
- 原型製作過程本身的利潤保留在內部。由於以下原因，將原型製作過程外包出去可能會更好：
- 最新的過程通常在屋外可用。這是由於原型製作過程的快速變化以及這些原型製作過程所需設備的資本成本所致。
- 原型設備不需要維護或說明。隨著時間的推移，必須對決策（內部或合同原型）進行分析。

例如，內部 3D 打印的成本（塑料零件）通常被禁止，因為資本成本、機器尺寸，所需培訓和技術變革步伐在 2000 年之前都太高了。但是到 2005 年，辦公室裡的 3D 打印機變得很普遍。也可以通過各種 3D 打印方法完成鈹金或金屬零件的原型製作，但目前仍屬於快速轉彎原型製作設備領域（利用鑽孔/加工/沖壓的標準金屬製造方法）。原型製作過程的另一個考慮因素是原型是否以以下任一方式製造：

- A.將生產零件的同一供應商
- B.與將來的生產零件位置選擇無關的供應商

利用相同供應商的一個優勢是，某些問題是通過原型零件解決的，從而可以平滑生產零件的流程。但是，有時使用獨立於將來生產零件的供應商所獲得的速度會更快地獲得原型零件。同樣，沒有一個答案適合所有獨特的情況。附錄 該附錄提供給 EPE 設計人員，以使他們了解一些常見的鈹金沖壓和成形方法。此外，還有一些有關確定鈹金設計尺寸的最佳實踐的信息。EPE 設計師將設計相當多的鈹金零件，因為鈹金可以提供許多外殼各個零件所需的強度。常用的金屬包括鋁和不銹鋼。此處顯示的許多材料已在公司設計指南中普遍顯示，EPE 設計師有望找到有用的信息。像往常一樣，設計人員還應該諮詢鈹金加工商，以查看此信息是否與他們的加工過程一致。工程圖上鈹金的尺寸放置尺寸時應避免增加或減少材料的厚度和公差，並應根據零件的功能提供尺寸。底座和底蓋如圖 4.5 所示。注意，通常所有尺寸都應適用於零件的外部。當必須使用內部尺寸來確保配合零件的配合時，可以在尺寸中添加內部一詞，以強調零件的尺寸與另一零件匹配的觀點（因此很關鍵）。最重要的方面是，尺寸在最關鍵的項目上，也就是說，封皮確實可以安裝在基座上。尺寸標註鈹金零件中折彎的尺寸應從切線或延伸點開始應用，而不應如圖 4.6 所示在半徑中心進行。切線點或擴展點更好，因為可以測量這些點，這是重要的目標。只要將尺寸賦予無法（輕鬆）測量的點，就可能導致歧義。需要指出的另一點是，通常，半徑的中心並不是設計中實際需要的半徑，而零件的邊緣更為關鍵。一個更簡單的經驗法則可能是，如果不需要半徑中心來構造零件，那麼可能就不需要半徑中心的尺寸。還要在圖 4.6 中註意，銳角和鈍角的尺寸 B 可以用從底部到該角度的上高度的尺寸代替（因為確定了直角的尺寸）。這個尺寸將更有價值，因為它可以通過高度計輕鬆到達（檢查）。圖 4.5 功能控制圖 4.6 彎曲尺寸 最小圓角高度 為了提供足夠的材料以正確形成彎頭，最小圓角高度應如圖 4.7 所示。如果設計要求的尺寸小於圖 4.7 中的最小 $2.5T + R$ ，則必須添加衝擊力才能彎曲然後切

斷，這需要額外的操作，但要增加成本。圖 4.7 最小圓角高度 彎曲之間的最小距離 具有類似於圖 4.8 所示的 Z 形彎曲的零件，彎曲之間的最小距離應不小於所示值。而且 U 形件的折彎之間存在最小的縱橫比。如圖所示，成型工具不能做得足夠小以避免在已經產生的彎曲處干擾金屬。很好的做法是在相對較高的深寬比零件上想像（在圖紙上有草圖）成型工具本身，以查看成型工具的尺寸是否實用。孔鄰近彎曲的位置 為了防止在彎曲之前刺穿或打孔的孔變形，孔邊緣與彎曲邊緣之間的最小距離應如圖 4.9 所示。這種變形採取橢圓孔的形式，材料厚度增加，這在大多數設計工作中是無法接受的。注意，計算 X 尺寸，使 Y 不小於 $1.5T + R$ 。對於如圖所示平行於彎曲的插槽，以下微型最小距離應適用：當 $L = 1$ 英寸時， $A = 2T + R$ 當 $L = 1$ 至 2 英寸時， $A = 2.5T + R$ 當 $L = 2$ 英寸或更大時， $A = 3T + R$ 圖 4.8 彎曲之間的最小距離 圖 4.9 彎頭附近的孔的位置 孔的位置以防止變形 為防止零件的邊緣或孔之間的材料變形，打孔的最小距離計算必須考慮：

- A. 使用的材料，其厚度和物理性質
- B. 孔的形狀和大小
- C. 孔應用

圖 4.10 防止變形的孔的位置 標稱最小距離如圖 4.10 所示。上面列出的變量應用於確定特殊要求，如圖所示，可以通過開槽避免邊緣變形。沖孔 如果孔的直徑大於材料的厚度，則可以在鈹金零件上經濟地打出圓孔。如果孔直徑小於材料厚度或小於 0.032 英寸，則必須鑽孔。正常的沖孔公差是距邊緣的 ± 0.010 英寸和孔之間的 ± 0.005 。這些對於 數控（NC）機器（如 Strippet 和 Amada 製造的機器）被認為是正常的。有關此內容的更多信息 4.8 公差。圖 4.11 說明了兩種用於標註孔尺寸的方法，每個方向只能使用一個基準。除非有充分的理由進行其他操作，否則請使用零件的左下角或左上角作為基準。對於切割的角（平板、平板等），請將該角用作基準參考。對於折角，第一個孔應為基準參考（首選公差為 ± 0.03 ）。圖 4.11 也顯示了典型的穿孔尺寸。該圖將指定基本尺寸，詳細尺寸和所需的公差。在這種情況下，在圖紙標題欄中輸入了 ± 0.010 公差。大多數鈹金供應商都使用標準沖頭。他們應該能夠為您提供其標準打孔器的清單，這樣您就可以避免使用自定義尺寸的打孔器。沖頭包括用於鋁和低碳鋼板的圓形、方形、矩形和長方形沖頭尺寸的變化。內，外圓角半徑沖頭也可提供最常見的半徑。一些供應商也可能提供特殊的打孔器，例如標準連接器切口。應盡可能使用標準尺寸和標準公差，但在某些情況下，可能需要使用特殊工具。實際上，如果零件的數量足夠高，那麼即使是完整的模具也可以證明整個零件都是空白的。圖 4.11 沖孔 彎曲緩解 圖 4.12 中所示的三種設計對於質量或經濟性而言並不理想。在這些示例中，拉環底部的金屬會在成形過程中撕裂，從而導致應力上升，從而可能導致零件的最終故障。還顯示了添加一個切口，該切口在彎頭處提供了釋放。這些示例代表了良好的設計，可以緩解彎曲，以防止撕裂並最大程度地減少應力下的疲勞。浮雕可以具有一定的半徑（如圖所示），也可以是平方開的，基本上足夠深，可以位於半徑的切點處。凸版大約寬於材料厚度，但是由於沖頭寬度的限制，凸版通常不小於 0.03 英寸。

通常，此浮雕圖不會在圖紙上標註尺寸。而是將其與一般圖紙註釋一起稱為使用最小彎曲消除。圖 4.12 彎曲消除 邊角施工 在所有涉及相鄰凸緣的成形零件上，應加有切痕或凹口，以防止在成形操作過程中金屬撕裂或起皺。圖 4.13 所示的示例說明了必須留出的最小餘量。再次注意 彎曲線與平面的半徑相交。重要的一點是關於拐角的構造。在某些情況下，可能需要額外的強度來保證兩個連接圓角在拐角處的延伸，如圖 4.13 中示例 C 的封閉拐角結構所示。該角部將被焊接（在內部或外部）以將兩個垂直的凸緣彼此連接，從而大大提高了構件的強度。珠子和角撐 為了避免增加零件成本或增加重量增加較厚的金屬的成本，建議使用成型的珠子（肋）和角撐板。這種做法的示例是在大面積的側面板，支撐重物所需的小支架，機箱和機櫃上。圖 4.14 說明了各種類型。A 顯示了一個開放式末端中心壓條，可用於加固大型面板。B 表示直的封閉端珠。在需要更高剛度並保證模具製造額外成本的情況下，可使用這種類型的焊道。珠子相交處的半徑應為最小總珠子寬度的兩倍。C 表示使用圓角進行加固。但是此方法通常會產生油罐現象，可通過壓下所示區域來消除該現象。珠角設計也如圖 4.14 所示。珠子上 A 所示的尖角可能會撕裂周圍的金屬。如果磁珠與自由半徑相交，則 B 所示的磁珠角是更好的設計。C 所示的不相交的珠 通常與 B 所示的珠一樣強，並且生產便宜得多。金屬的拉伸可能會在珠子的兩端造成一些皺紋。為避免金屬邊緣變形，圖 4.14 的距離 X 應最小為 40T、距離 Y 應最小為 25T（其中 T 為材料厚度）。如果邊緣是帶凸緣的，則 X 和 Y 距離可分別減小到 30–35T 和 15T。如圖所示，在珠子和圓角結合在一起的情況下，兩者都應突出在零件的同一側，以實現最經濟的模具設計。最小彎曲半徑 推薦的各種材料和回火的最小彎曲半徑可以與材料的晶粒平行而不會破裂。除非絕對必要，否則不得求助於建議彎曲半徑以下的最小彎曲。可以從各種參考資料中獲得這些最小彎曲半徑，並且看起來像：

材料	厚度	最小半徑
7075 鋁合金, Temper –T6, 進行 90°冷彎	0.016	0.03–0.06
	0.032	0.09–0.16
	0.062	0.25–0.37

通常，工程圖的一般註釋區域中的註釋會指出：使用最小彎曲半徑（除非另有說明），這對鈹金供應商意味著將使用最小建議彎曲半徑。否則，最好在圖形上標註一個半徑。需要注意的重要一點是，彎曲應盡可能地實用以增加零件的整體強度，但通常應在材料厚度的數量級上。圖 4.13 拐角結構 圖 4.14 磁珠設計 圖 4.15 晶粒方向 晶粒方向 除非要求的彎曲半徑小於建議的最小值，否則不應在圖紙上指定材料的晶粒方向。在這種情況下，應在整個穀物上指定彎曲度。如圖 4.15 所示，彎曲方向與材料顆粒的方向成 90°。可以為硬或彈簧回火板中的最小彎曲半徑指定晶粒方向，或者為裝飾（例如，絲網印刷）零件顯示晶粒方向。回火 應該首先考慮較硬的回火，因為它們通常允許使用更薄、更強和更輕的材料。但是較硬的材料需要更大的彎曲半徑。推薦插槽寬度 以下所有插槽寬度均視為標準寬度：折疊 如圖 4.16 所示，摺痕用於可以向後彎曲的材料。為了防止開裂，特別是在展平的類型上，通常在

材料的晶粒上折疊（參見晶粒方向一節）。因此，通常指定 晶粒方向。 圖

4.16 折疊 捲曲 捲曲可用於鈹金零件的邊緣，其中剛性要求大於普通折疊可以滿足的要求。這些邊緣捲曲的尺寸應符合圖 4.17。圖 4.17 捲曲 壓接 大片的邊緣可能會捲曲以增加剛度並防止油罐。典型的壓接如圖 4.18 所示。圖

4.18 壓接 緩動件 緩動件用於在金屬板零件中提供用於搭接接頭等的台階。腹板或緩動件的寬度（尺寸 L）應至少為尺寸 D（偏移深度）的 3 倍。對於諸如熱處理鋁合金之類 的脆性材料，建議最小偏移量為偏移深度的 6 倍。如果設計要求偏移深度超過 材料厚度，則應使用 45°搖動。見圖 4.19。圖 4.19

緩動件 壓印 凹坑最常見的應用是沉頭螺釘或鉚釘，見圖 4.20。柔軟的材料容易凹陷。除 非熱壓痕，否則諸如 2024、7075 的鋁合金以及較硬的不銹鋼可能會開裂。給出 了用於凹坑的尺寸數據。圖 4.20 壓印 沉頭孔 如果較厚的材料不允許打孔或凹陷，則可以採用鑽孔和沈頭孔來容納扁平加熱螺 釘。見圖 4.21。該圖說明了 82°夾角平頭螺釘（100°也是常用的平頭類型）的 沉頭孔尺寸。注意為 #6 平頭螺釘指定的樣品標註（精密設計）。該標註給出

（間隙）孔直徑和沈頭直徑（而不是實際的刀柄直徑和螺釘頭直徑）。還要注意，材料的厚度通常至少是螺釘頭的深度。圖 4.21 沉頭孔 彎曲變形 圖 4.22

說明了成形操作時發生的變形情況。當重的材料以更陡的內部彎曲半徑 彎曲時，這種變形特別明顯。當材料厚度小於 1/16 英寸時，或者當內部成形半 徑比材料厚度大時，幾乎不會引起注意。折彎內側的材料處於壓縮狀態，這會導致邊緣出現這種凸起狀態。此外，折彎 外側的邊緣會承受拉力，並且容易拉入。這種凸起或變形的情况通常無關緊要，並且被接受為標準做法。但是，如果這種隆起將對配合零件造成任何干擾，則應 在零件圖上進行參考，以便可以考慮進行二次操作以消除這種干擾。這種額外的 操作可能不需要工具，但會增加生產成本。圖中還顯示了為防止凸起引起的干擾而開發的毛坯（無額外生產成本）。圖 4.22 彎曲變形